

# Эффективные висмутовые волоконные лазеры и усилители

**И.А. Буфетов**

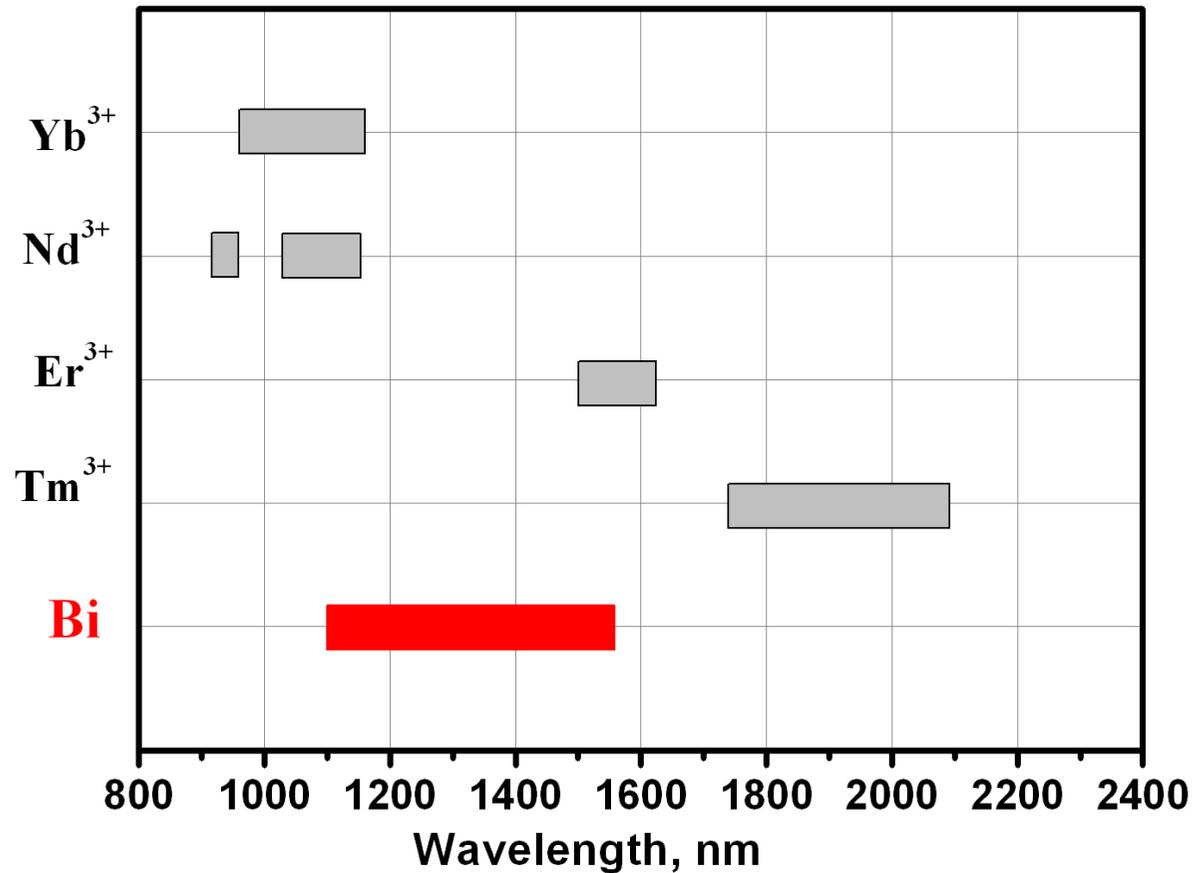
Научный центр волоконной оптики РАН

E-mail: [iabuf@fo.gpi.ru](mailto:iabuf@fo.gpi.ru)

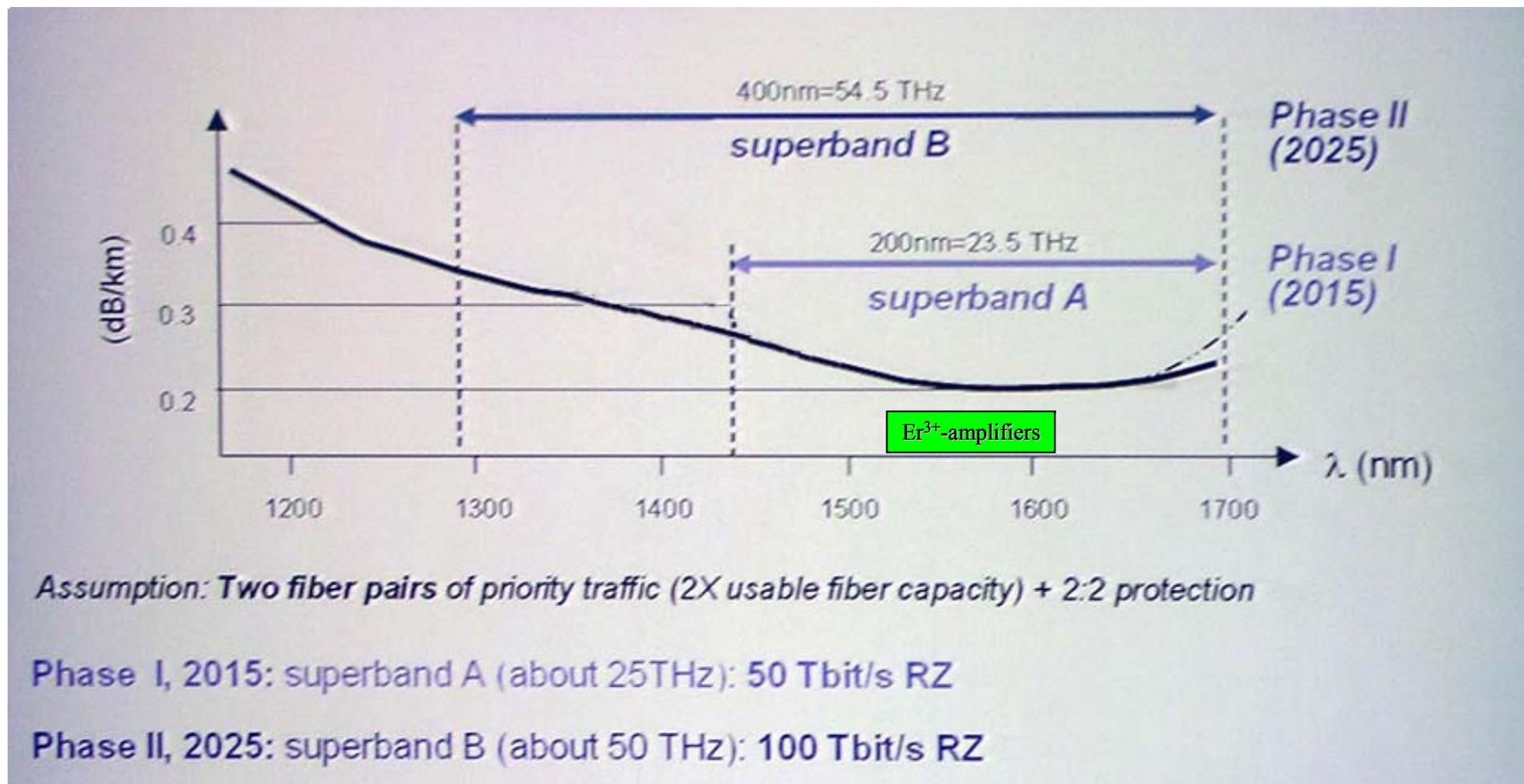
# Содержание

- Введение.
- Люминесцентные свойства стекол и волоконных световодов различных составов, легированных висмутом
- Люминесцентные свойства перспективных висмутовых волоконных световодов
- Какова физико-химическая природа висмутовых активных центров?
- Заключение

# Спектральные области существующих эффективных лазеров и усилителей

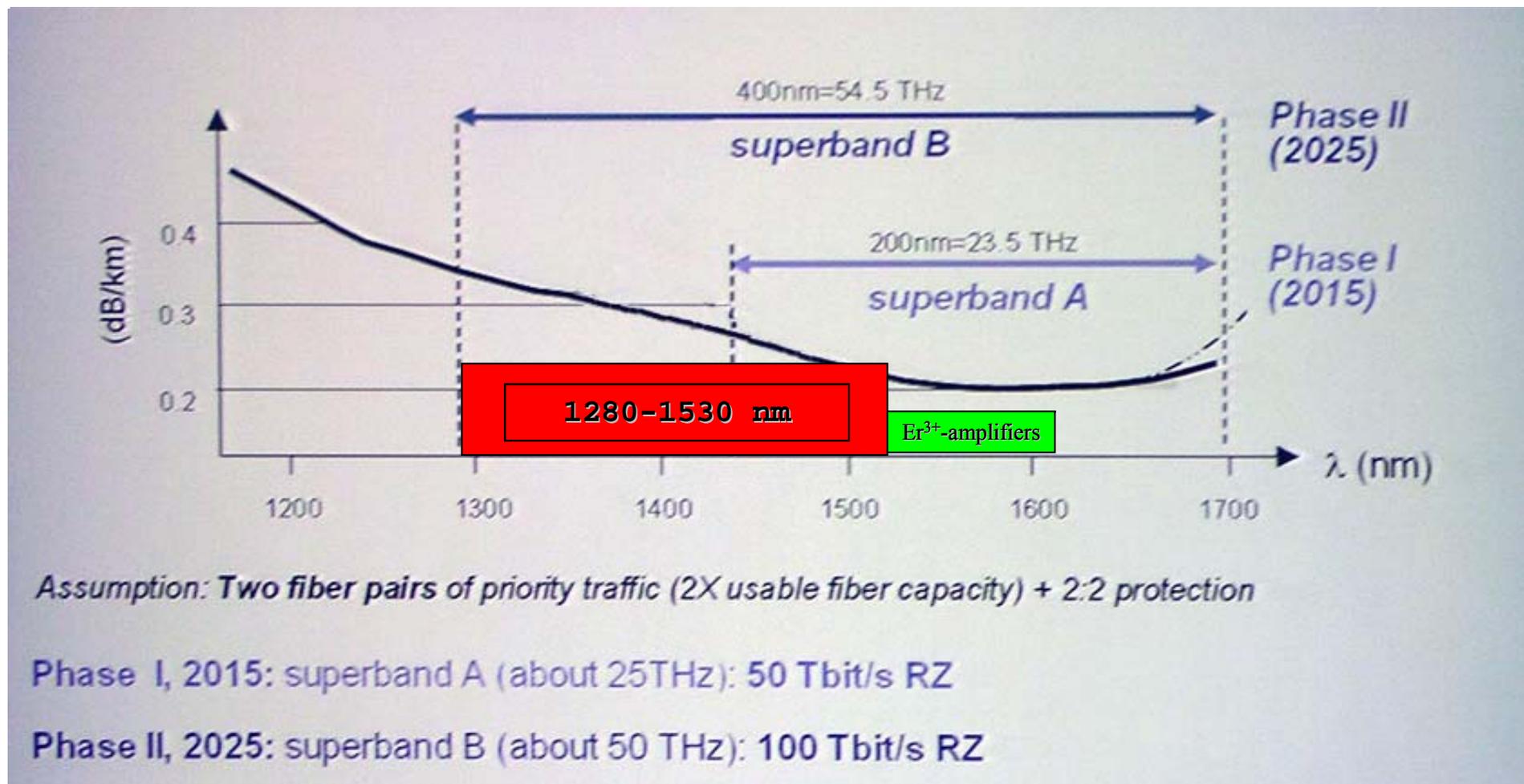


# Fiber bandwidth: superband exploitation scenario



*E. Desurvire. "Optical communications in 2025". ECOC'2005*

# Fiber bandwidth: superband exploitation scenario



**E. Desurvire. "Optical communications in 2025". ECOC'2005**

# Висмутовые активные среды

Публикации до 2000  
года

Лазеры на парах и  
плазме висмута

Генерация в видимом и  
ИК диапазоне.

(!)-Zhu Xu-hui and Liu Jian-  
bang. Appl. Phys.(1982)  
 $\lambda_s = 1170\text{nm}$

Висмутовые световоды-  
Гл. образом: световоды на основе пл. кварца,  
(MCVD технология), *состав сердцевины  
ограничен требованиями технологии*

Полученные результаты:  
Люминесценция в ИК диапазоне,  
Время жизни ~1 мс, зависимость  
спектров люминесценции от состава и  
длины волны возбуждения

1. Оптические усилители
2. Волоконные лазеры  
в диапазоне длин волн  
**1150-1550 нм**

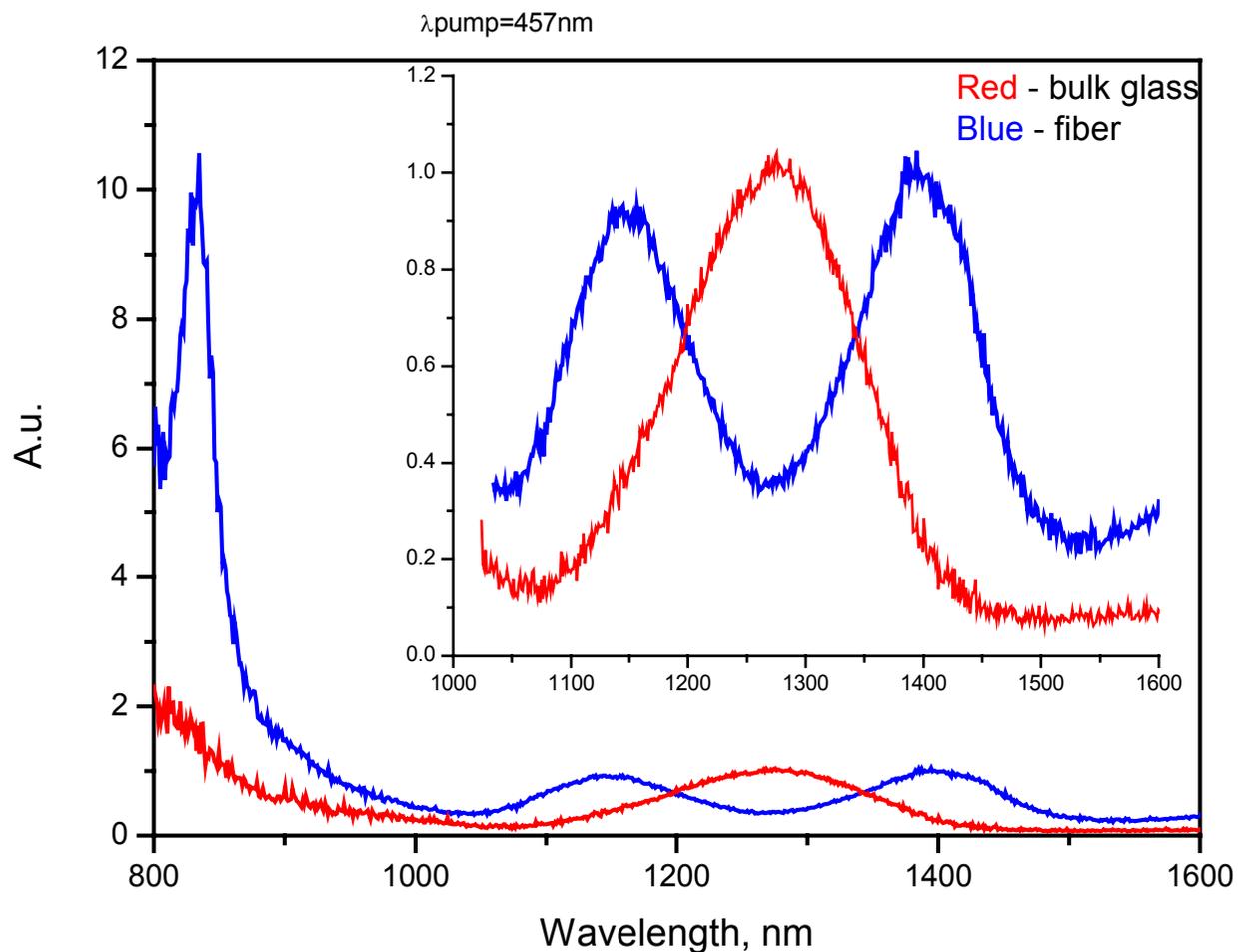
Объемные стекла и кри-  
сталлы, легированные Вi  
*большое разнообразие составов:*  
оксидные и неоксидные матрицы,  
легированные висмутом кристаллы.

Полученные результаты:  
ИК люминесценция, время жизни  
~1 мс, зависимость спектров  
люминесценции от состава и  
длины волны возбуждения, ЭПР,  
магнитный круговой дихроизм.

До настоящего времени – *лазерная  
генерация в объемных образцах не  
получена*

Сегодня ни одна из предложенных моделей висмутовых ИК активных  
центров не находится в удовлетворительном согласии с имеющимися  
экспериментальными данными.

# Зависимость спектра люминесценции от технологических параметров



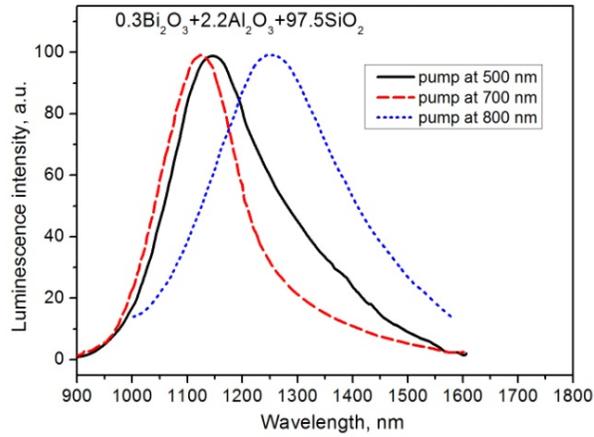
**В настоящей работе – технология практически фиксирована, варьируется только состав сердцевины световода.**

# Содержание

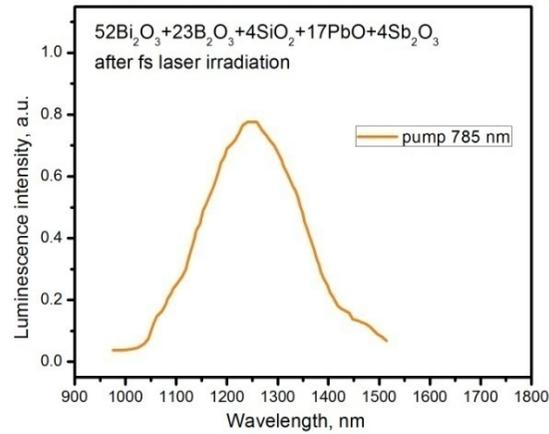
- Введение.
- Люминесцентные свойства стекол и волоконных световодов различных составов, легированных висмутом
- Люминесцентные свойства перспективных висмутовых волоконных световодов
- Какова физико-химическая природа висмутовых активных центров?
- Заключение

# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

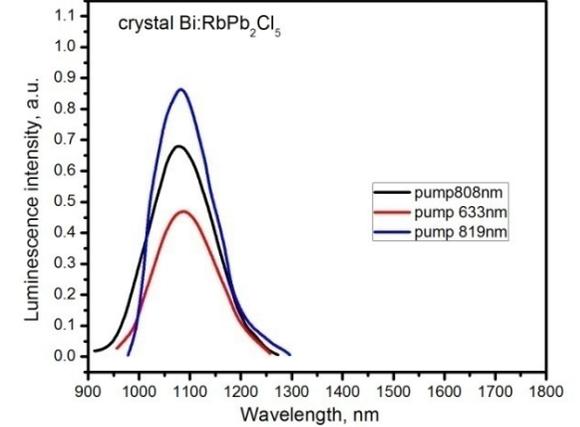
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



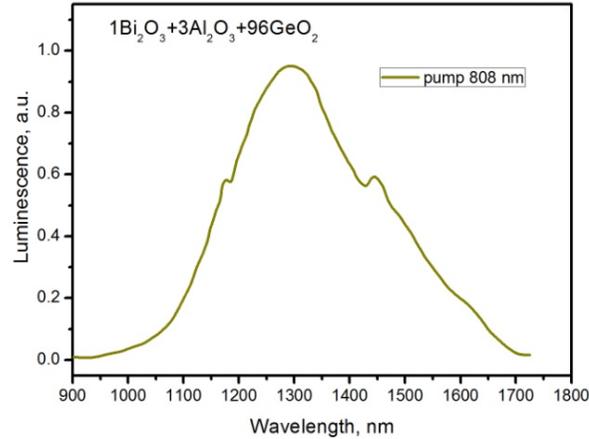
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



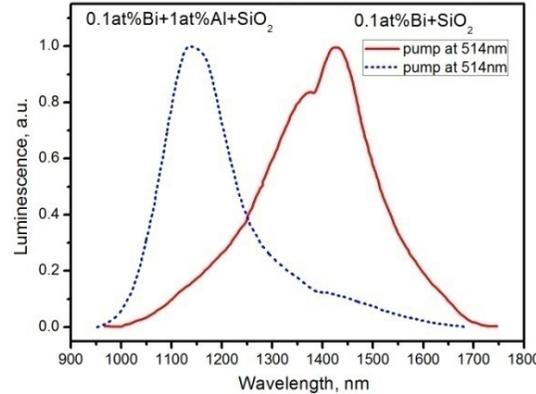
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



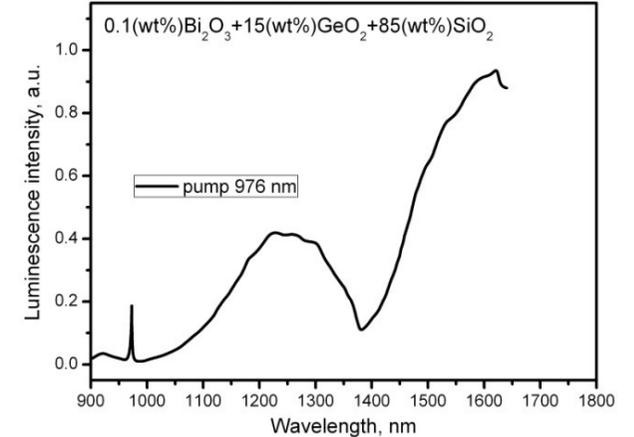
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



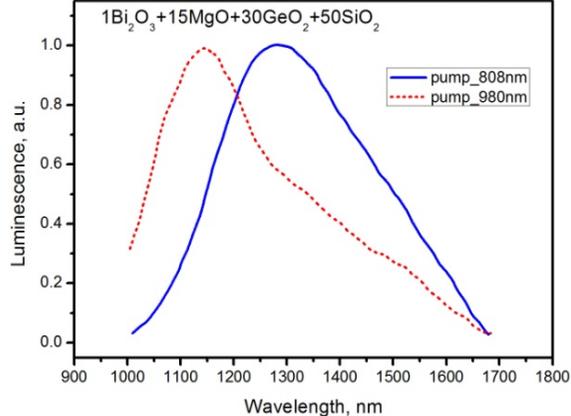
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



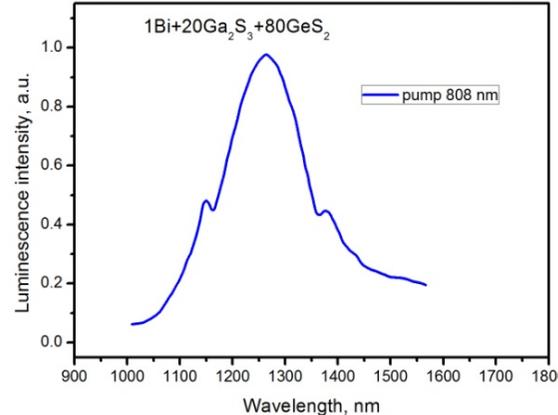
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



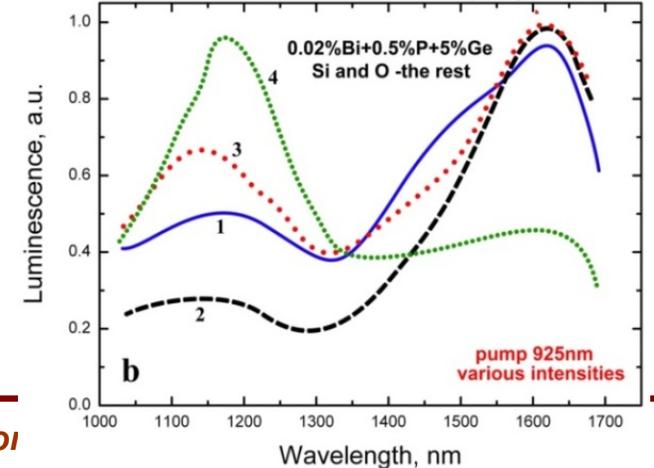
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)

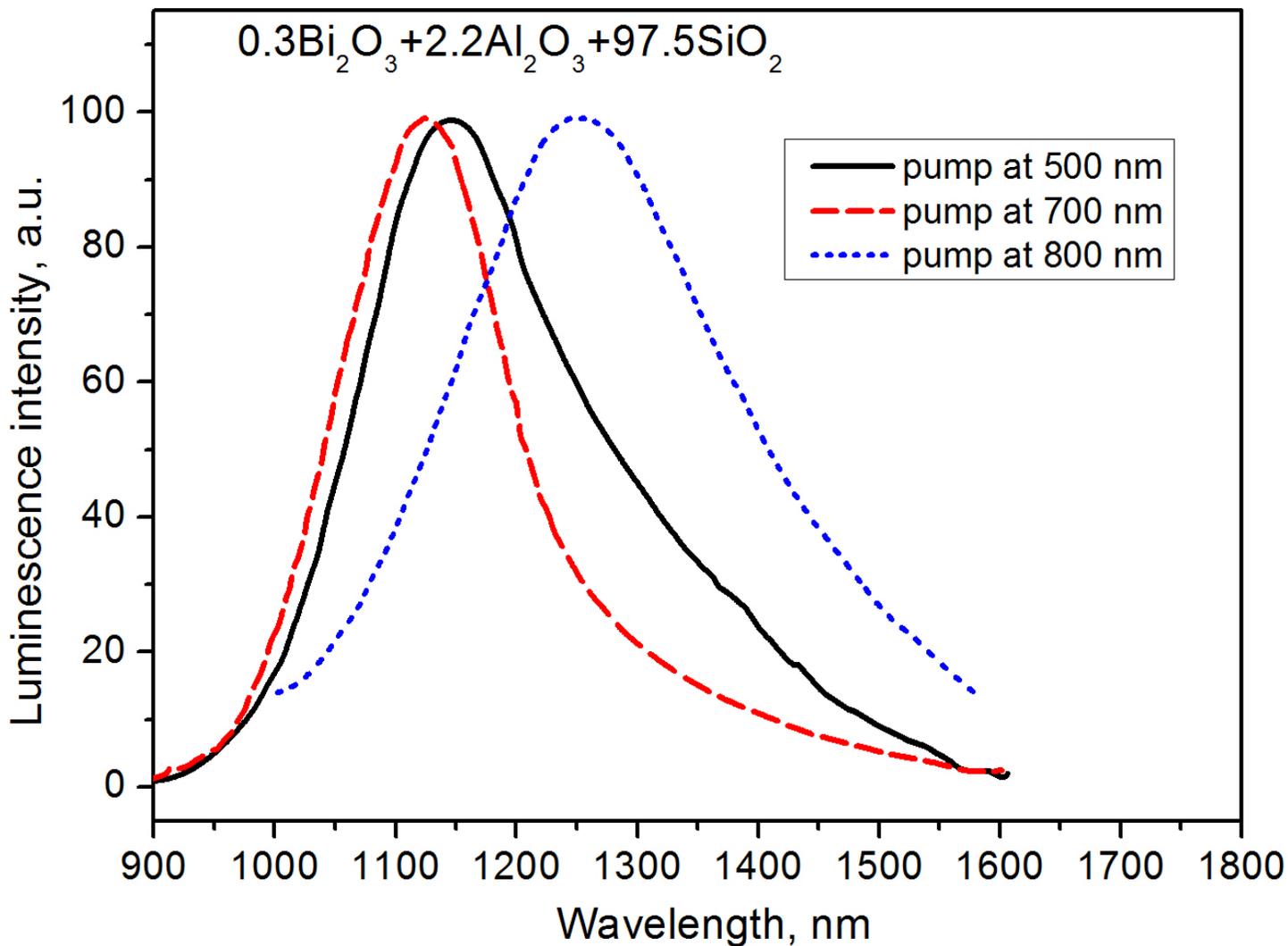


E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)



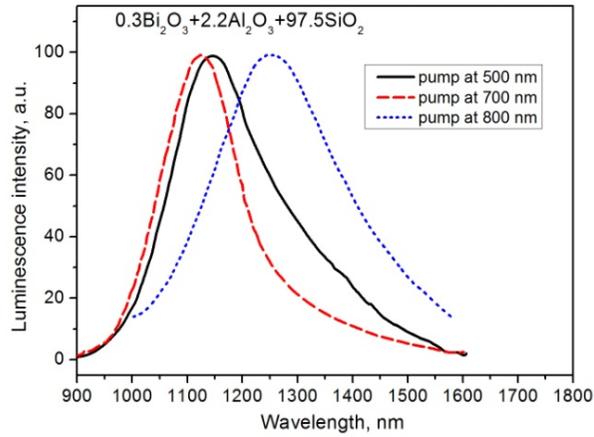
# Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).

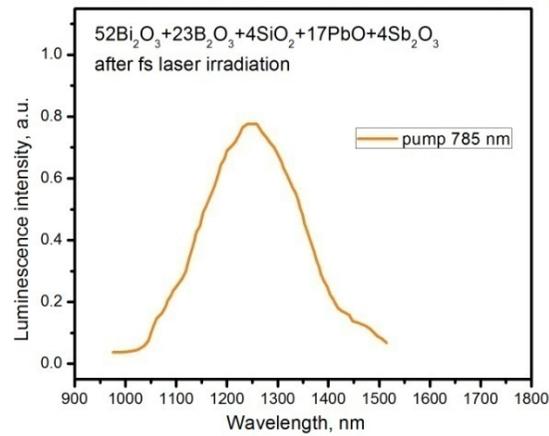


# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

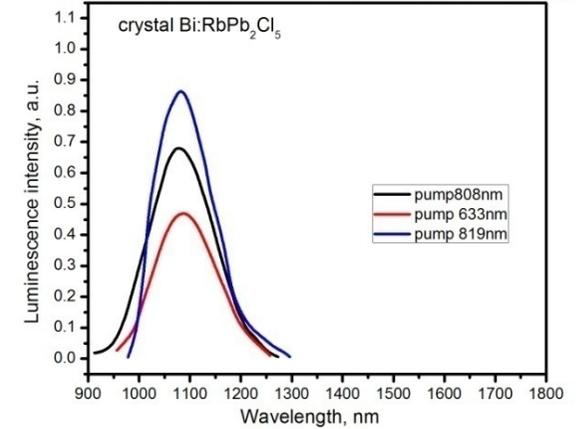
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



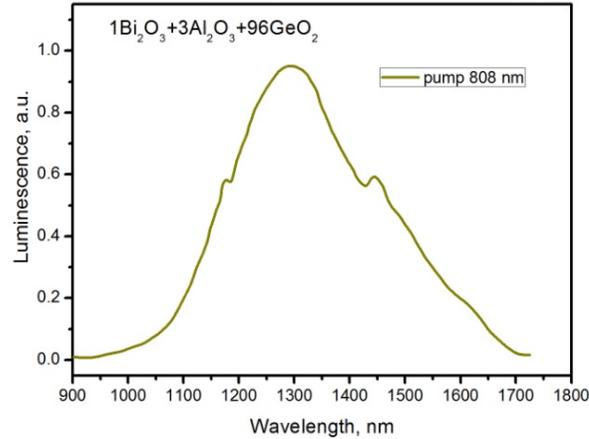
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



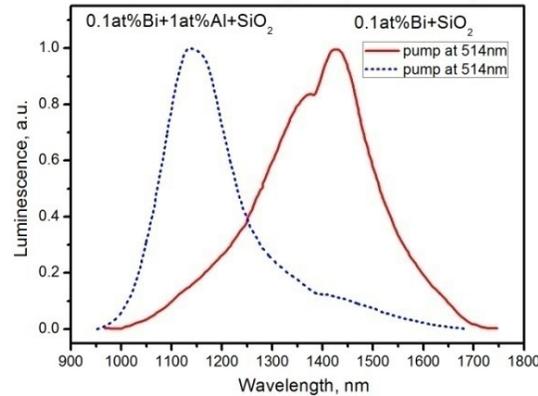
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



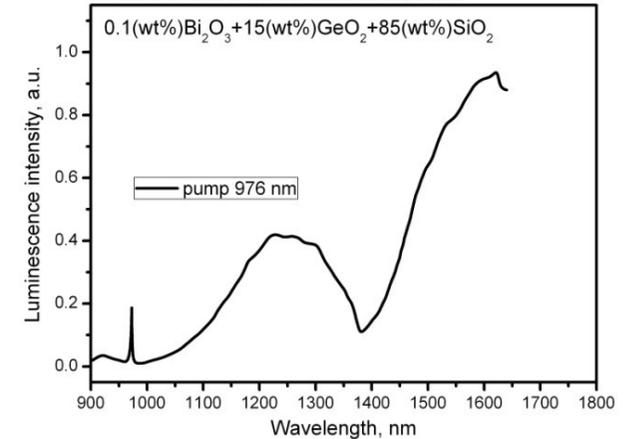
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



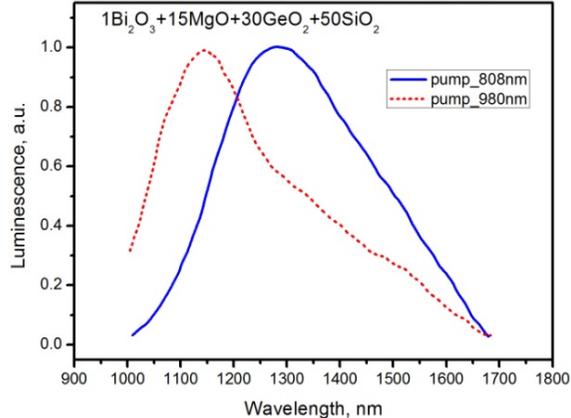
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



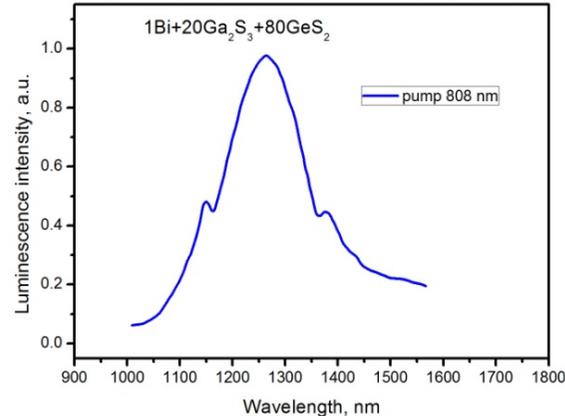
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



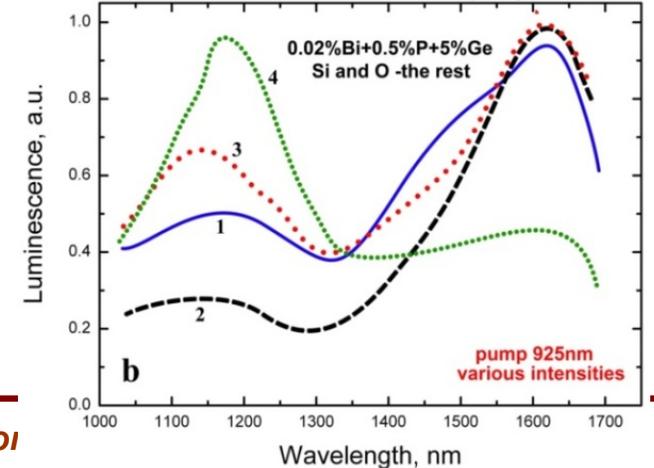
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)

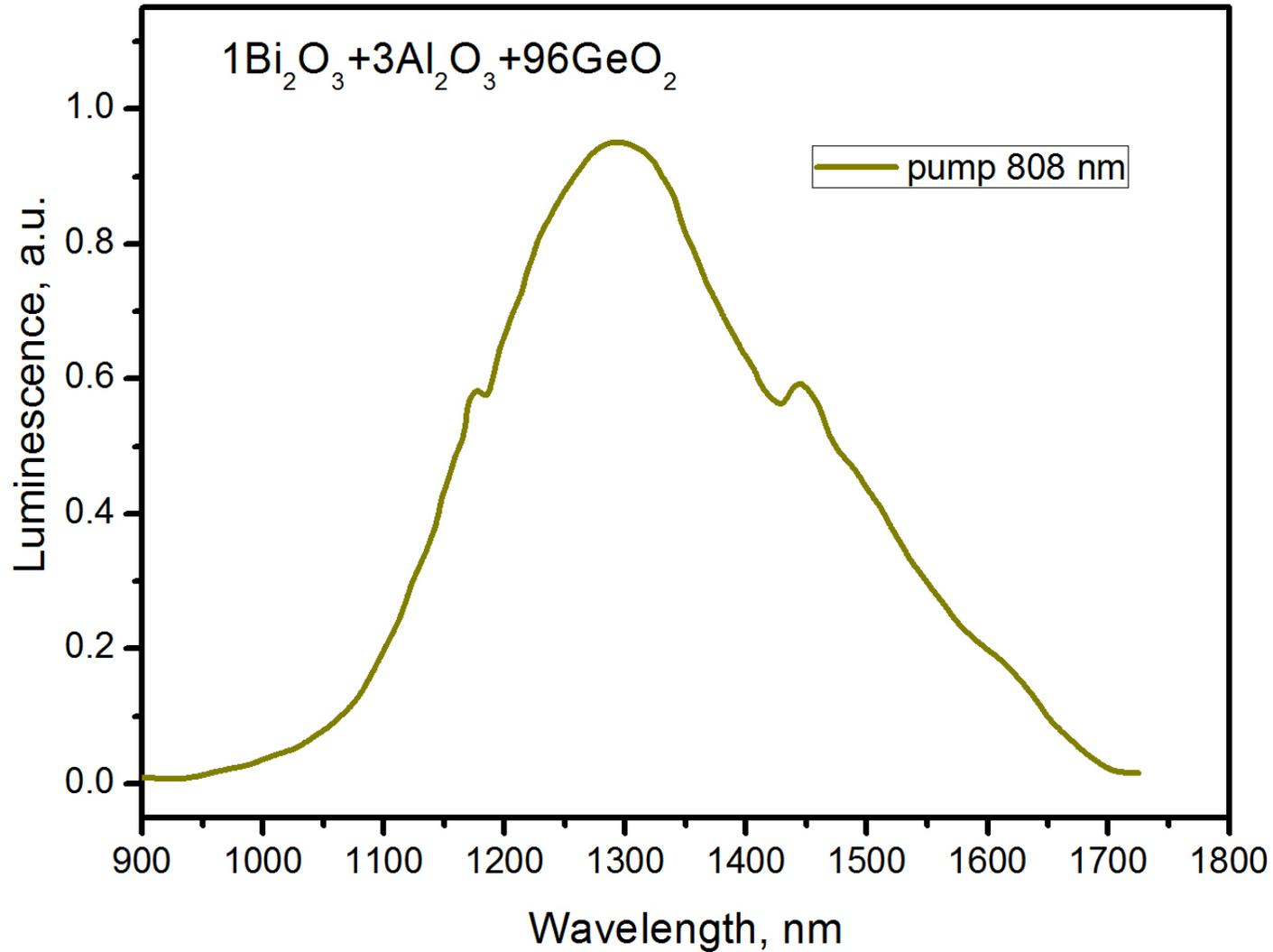


E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)



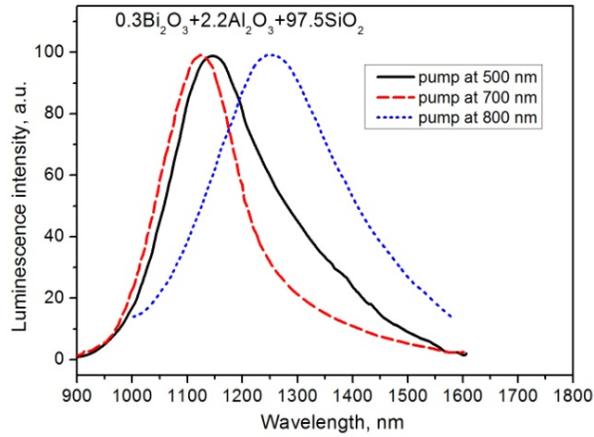
# Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).

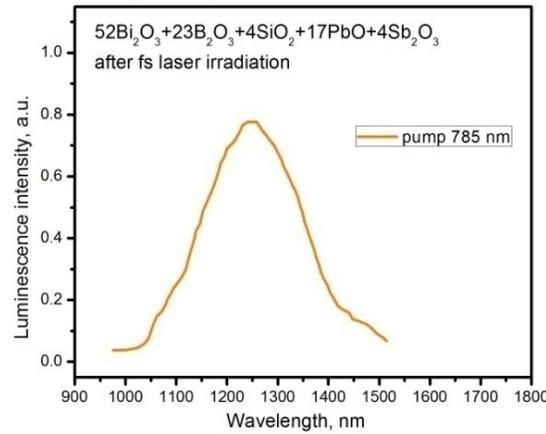


# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

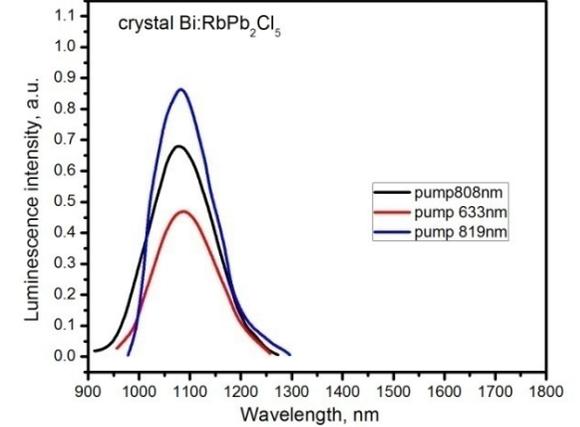
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



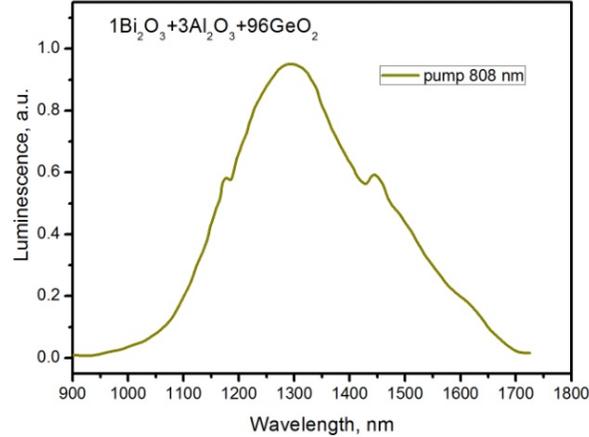
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



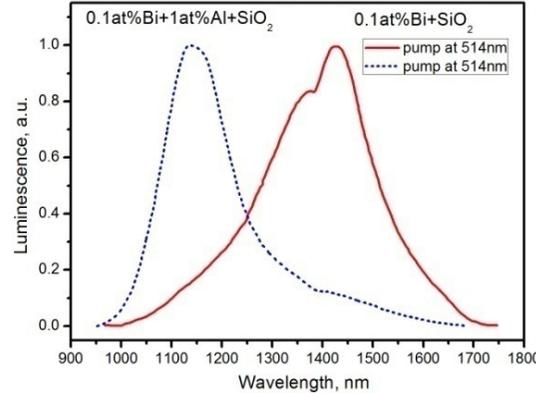
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



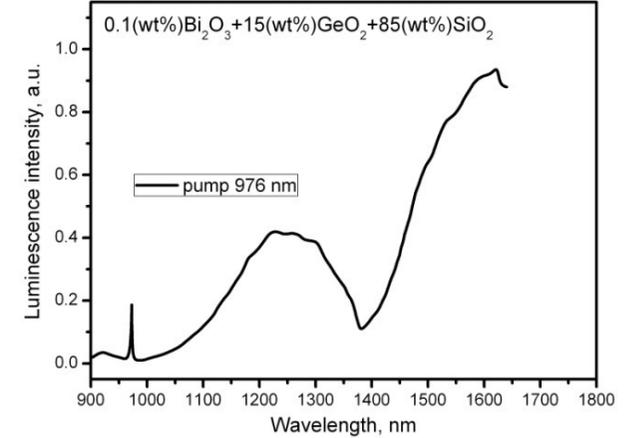
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



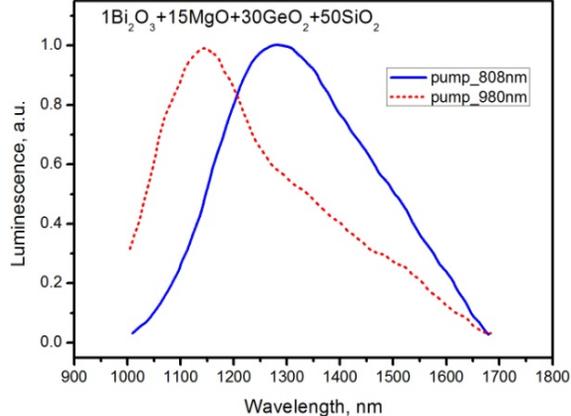
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



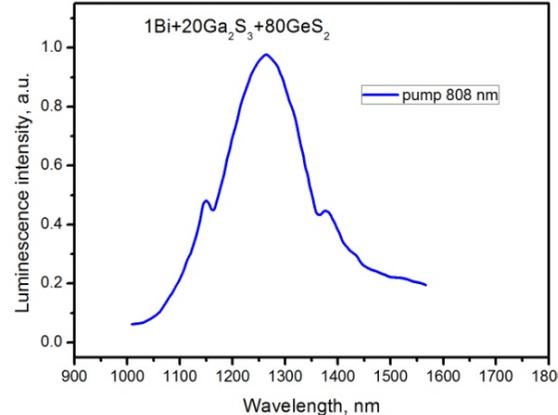
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



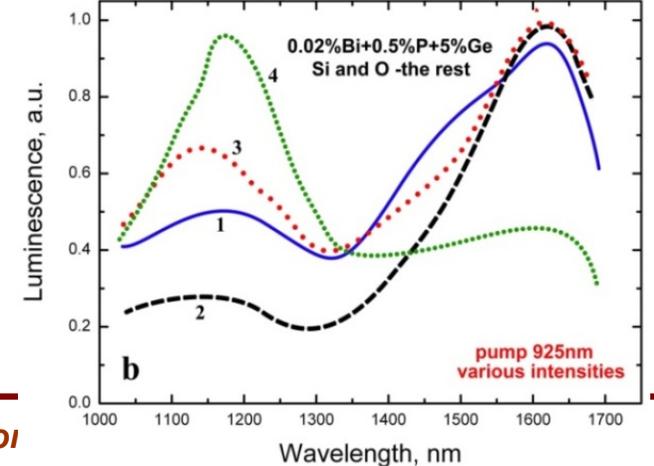
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)

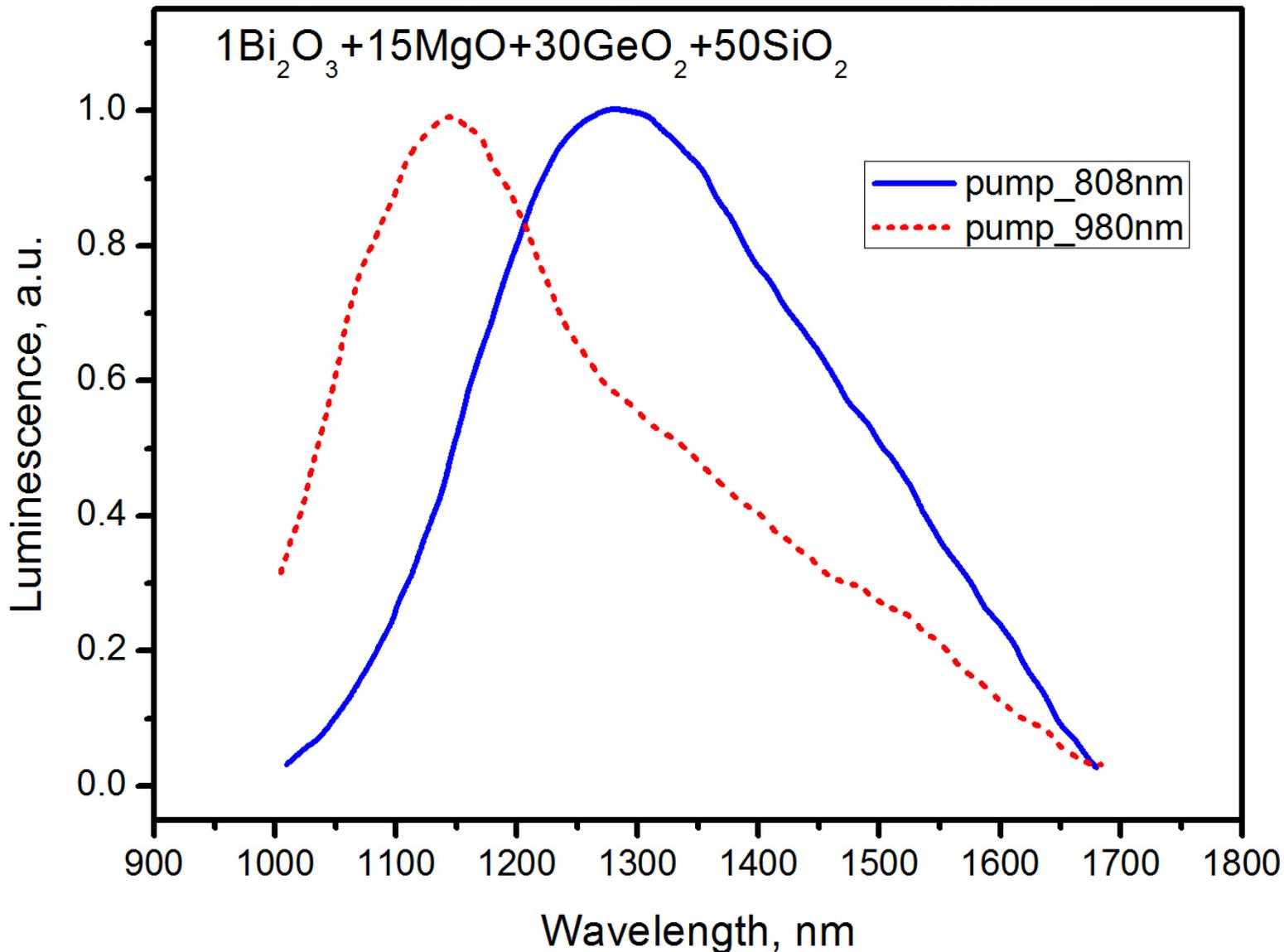


E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)



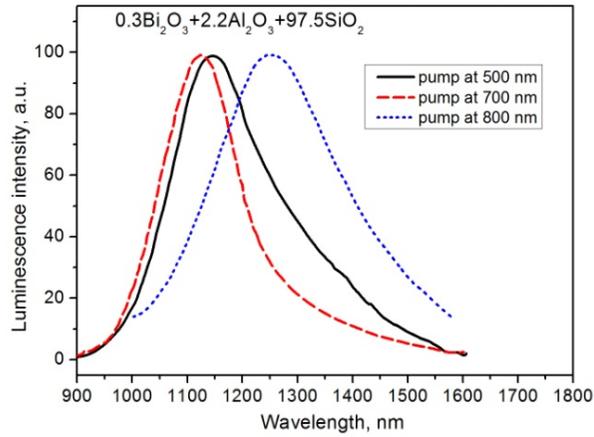
# Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)

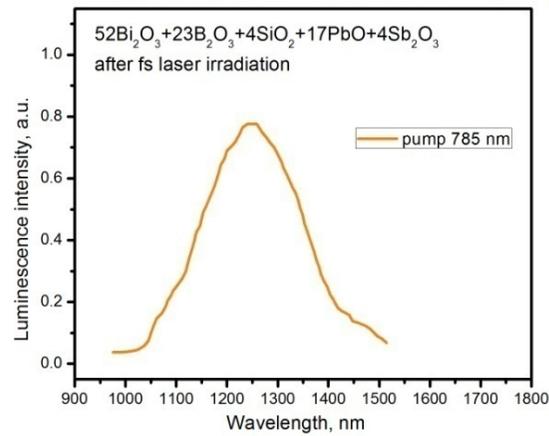


# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

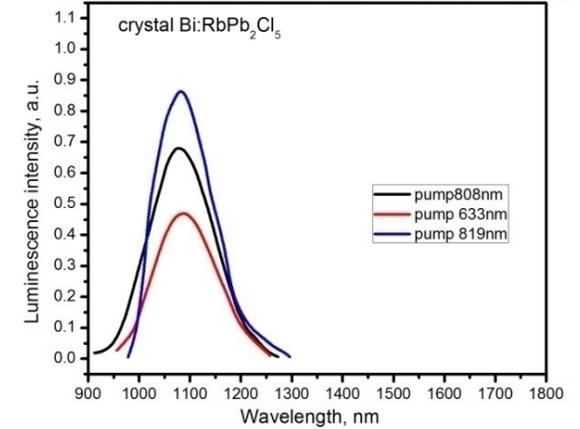
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



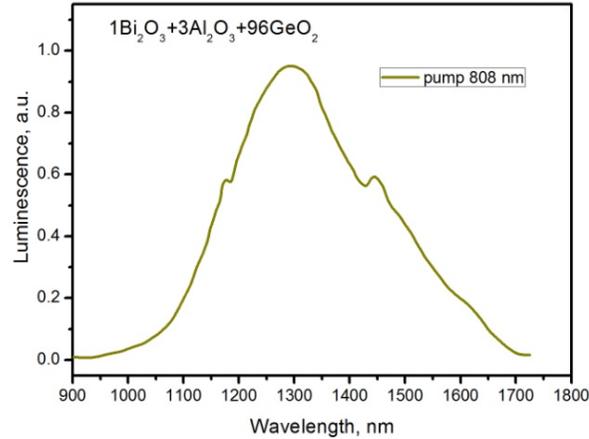
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



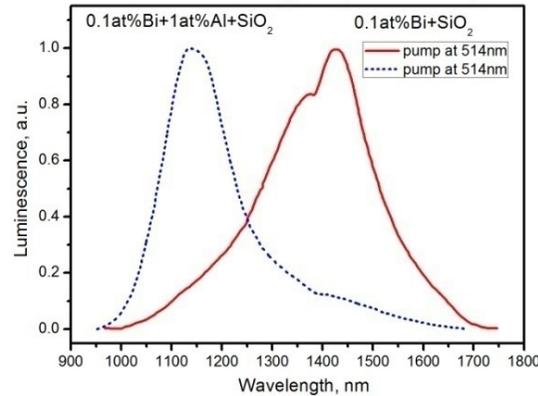
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



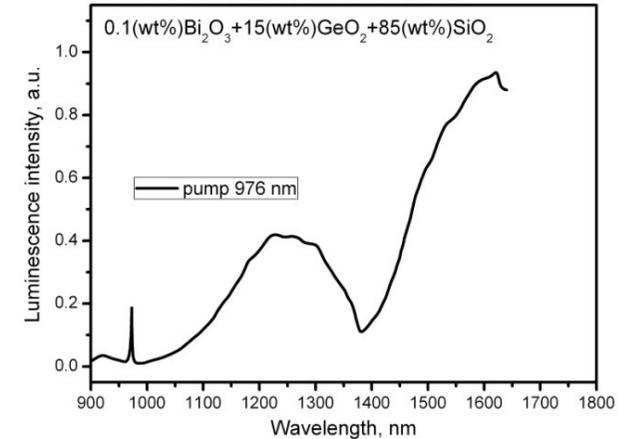
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



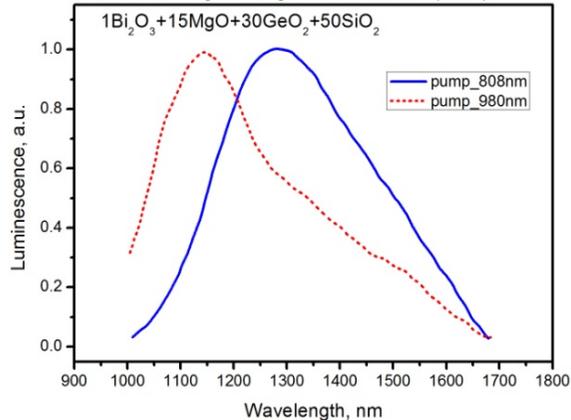
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



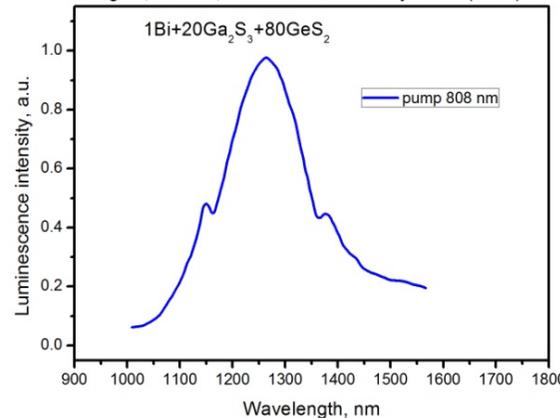
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



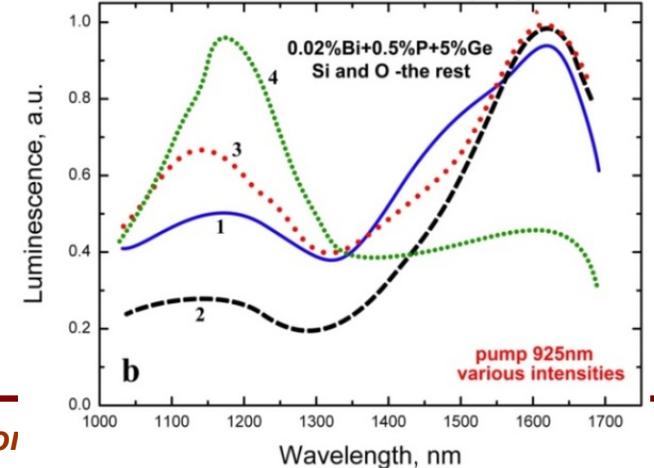
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)

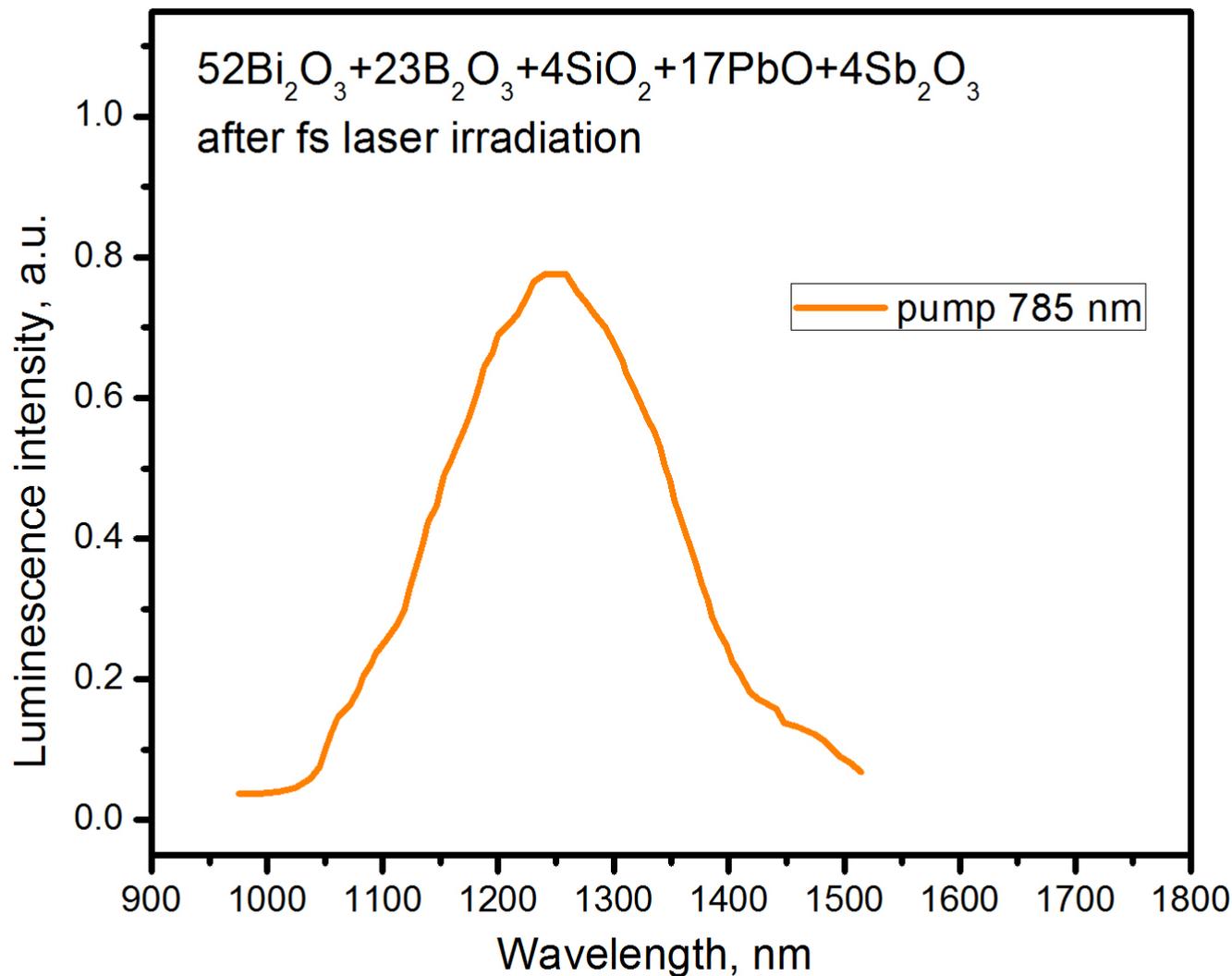


E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)



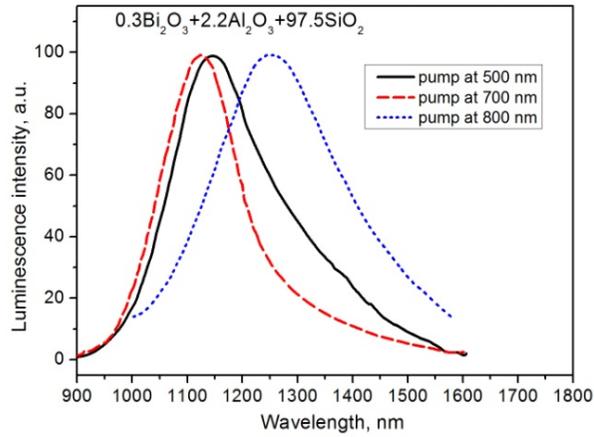
# Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)

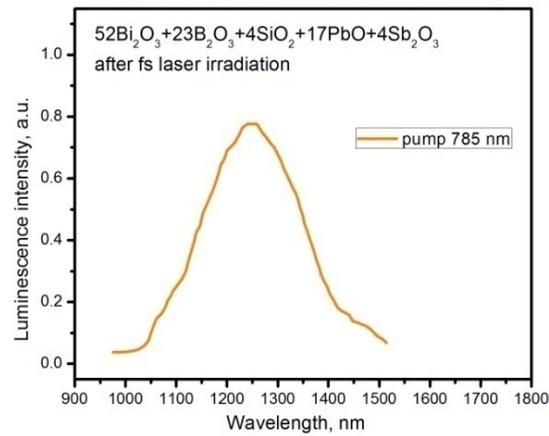


# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

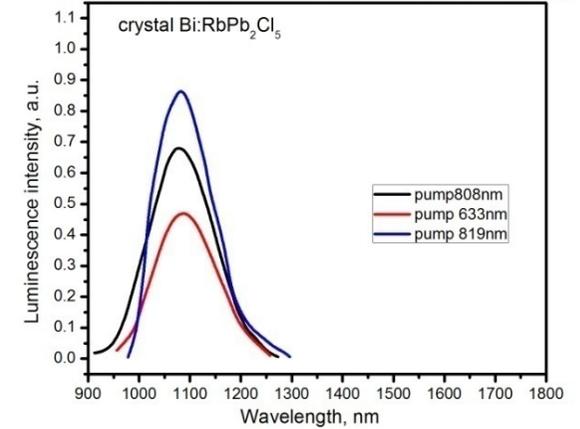
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



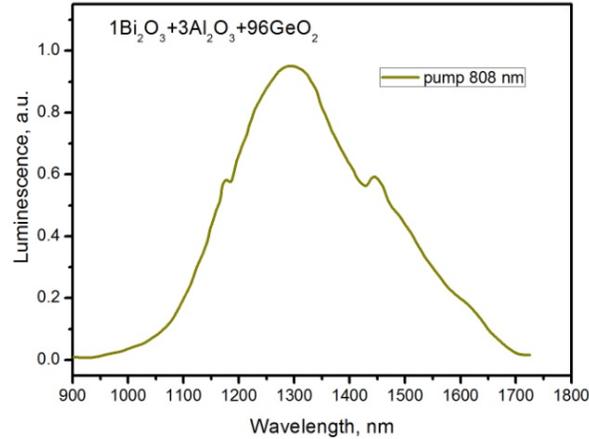
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



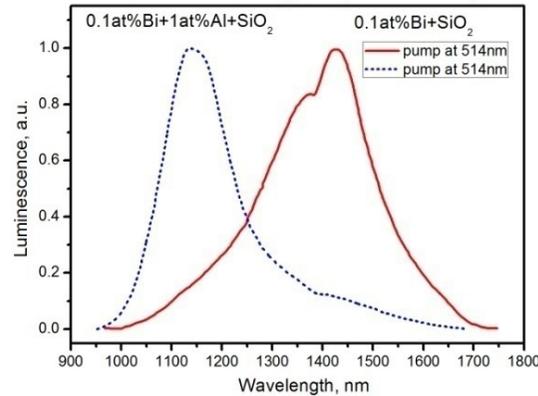
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



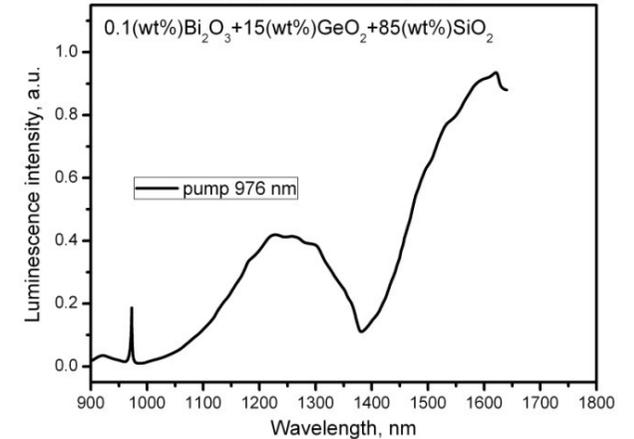
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



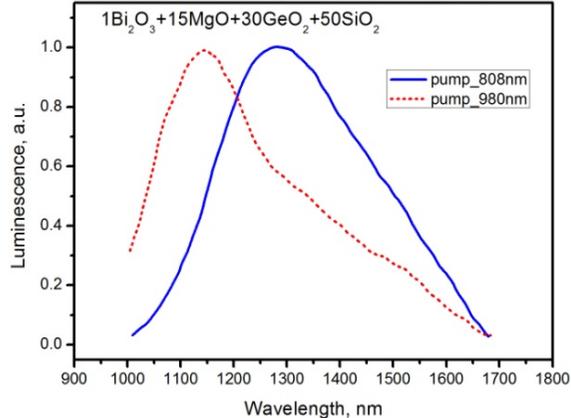
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



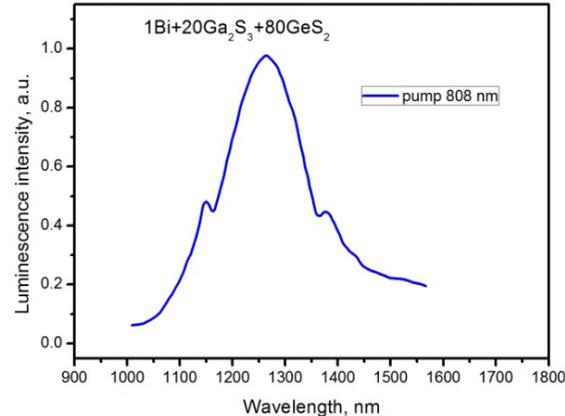
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



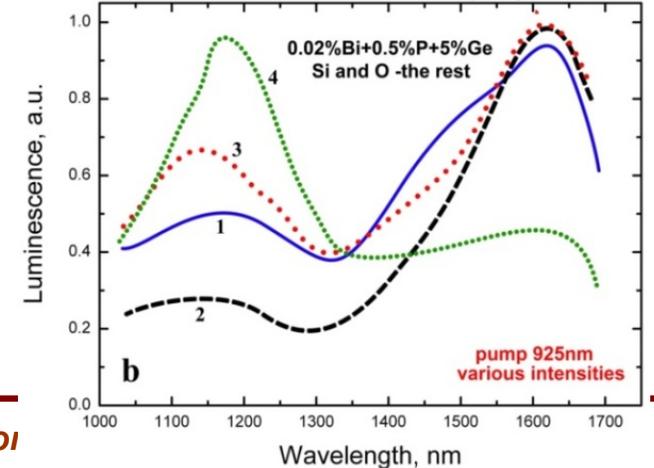
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)

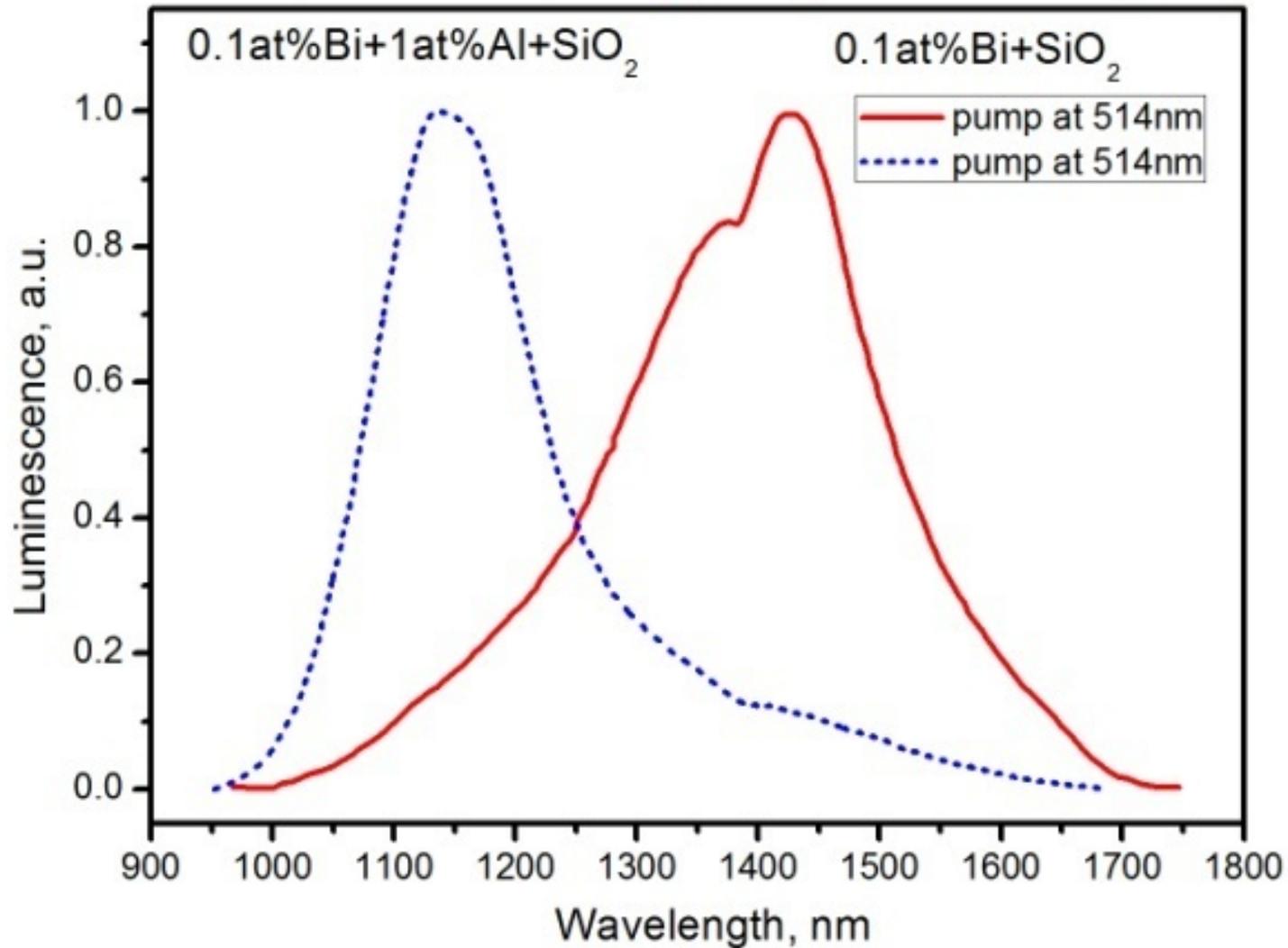


E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)



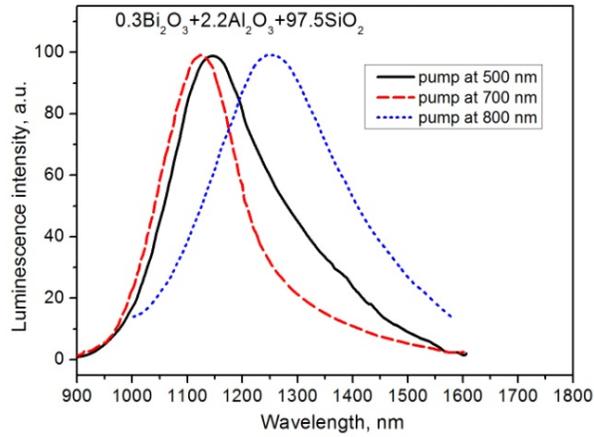
# Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)

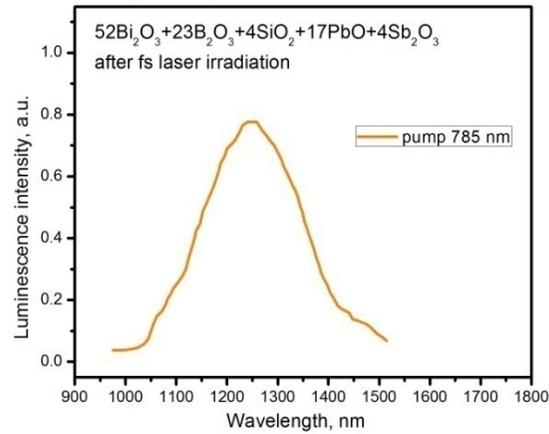


# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

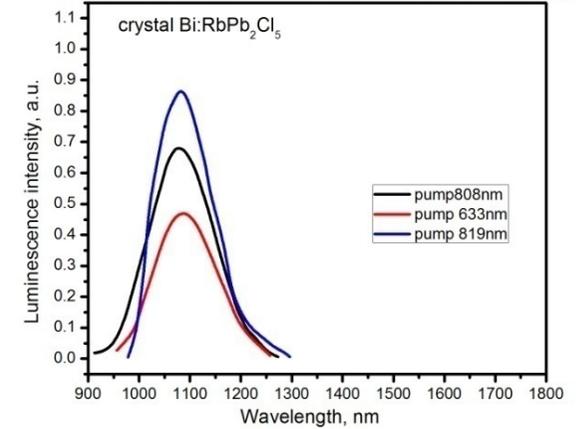
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



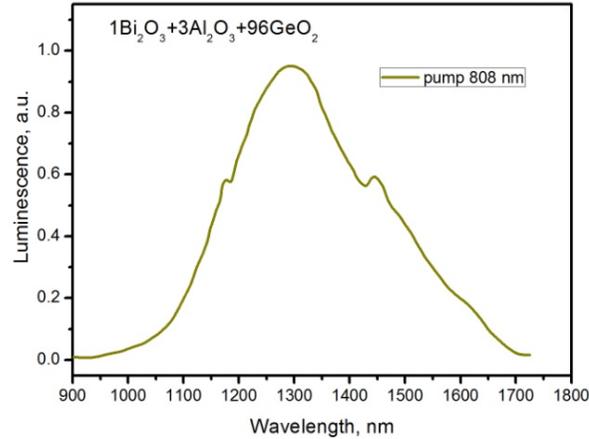
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



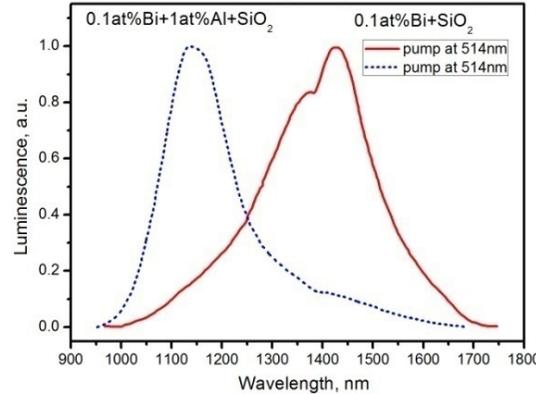
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



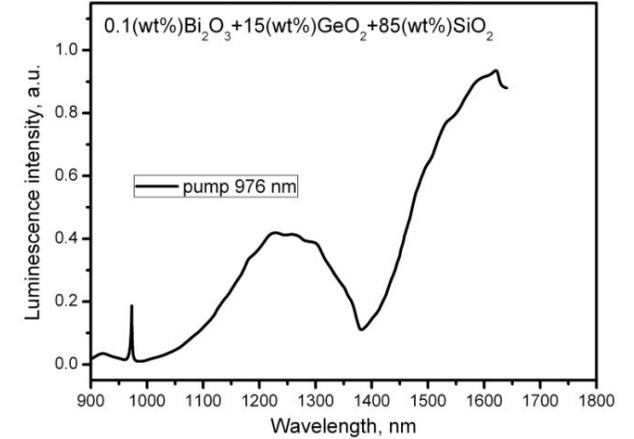
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



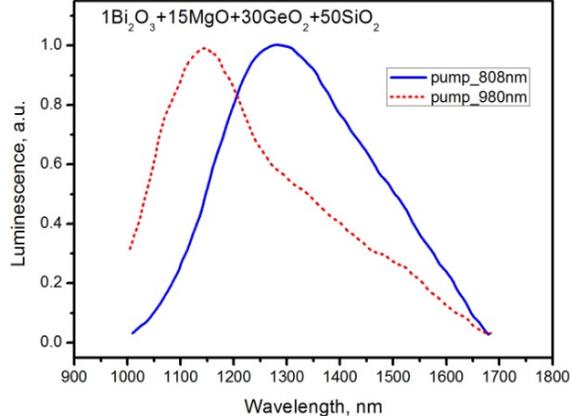
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



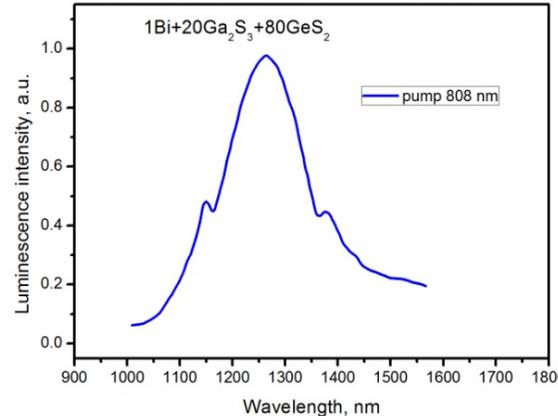
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



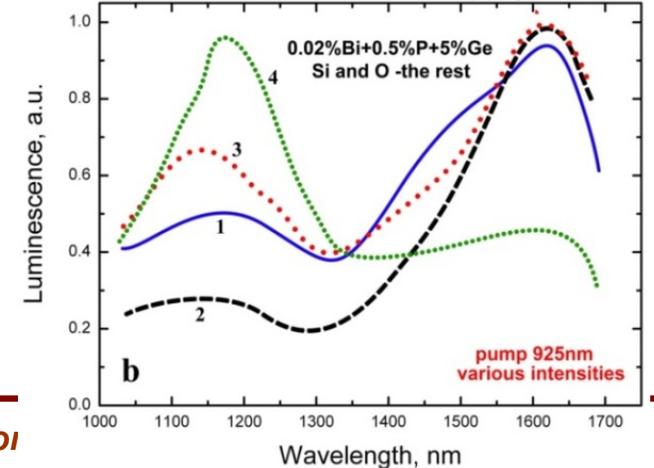
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



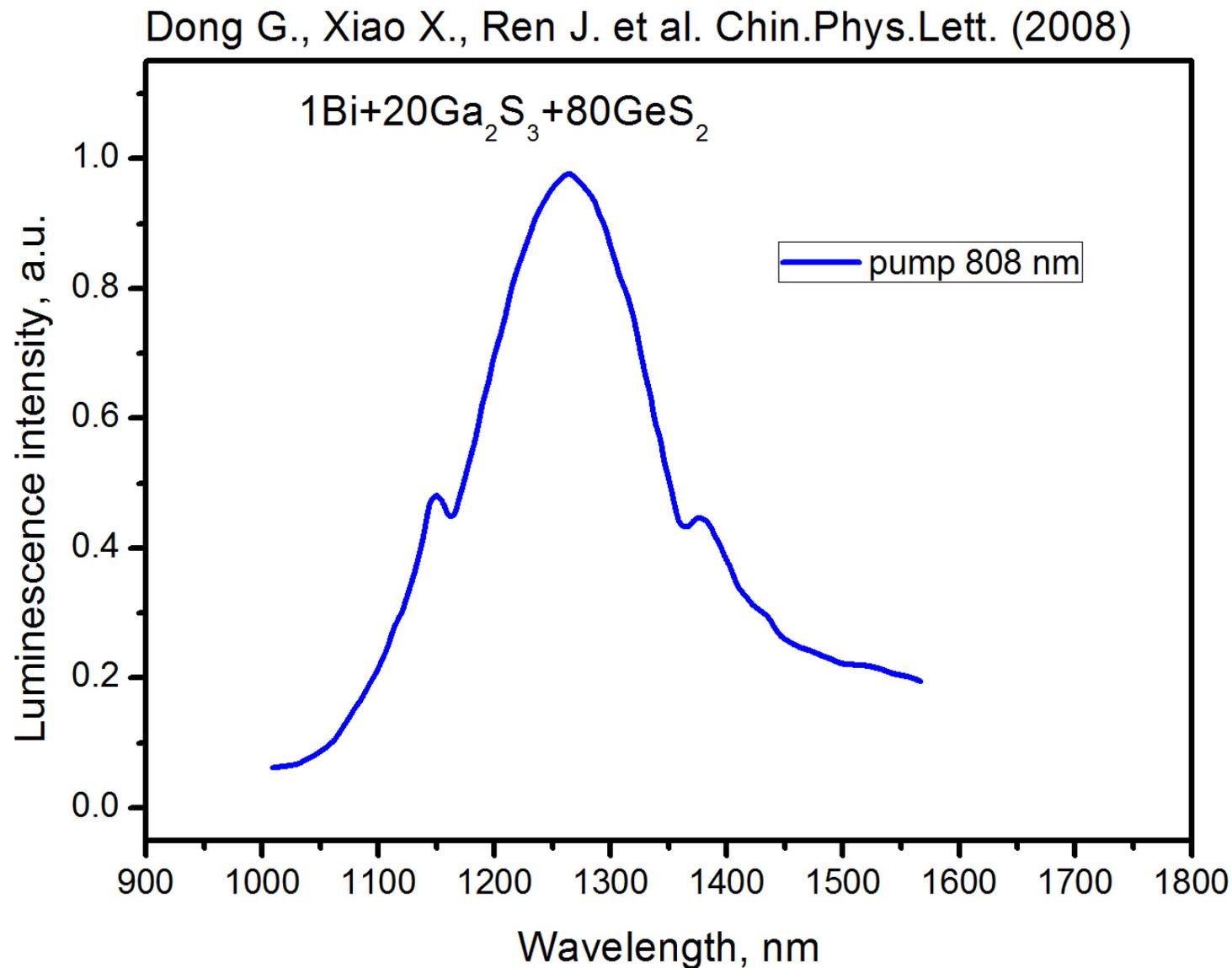
Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)



E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)

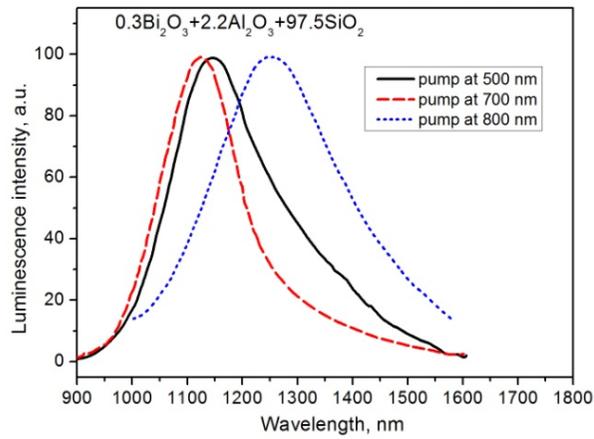


## Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

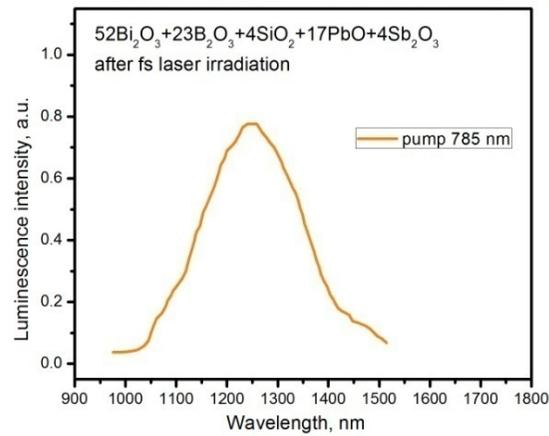


# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

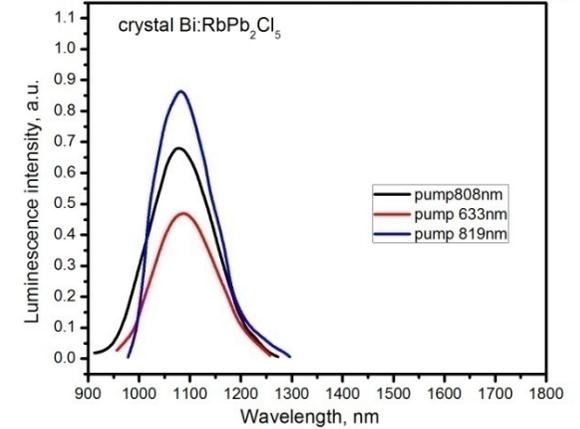
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



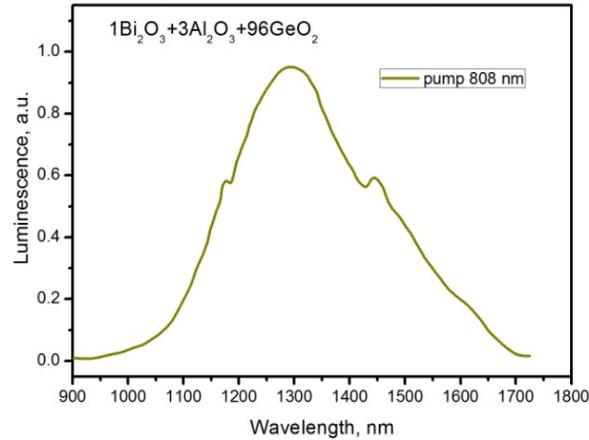
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



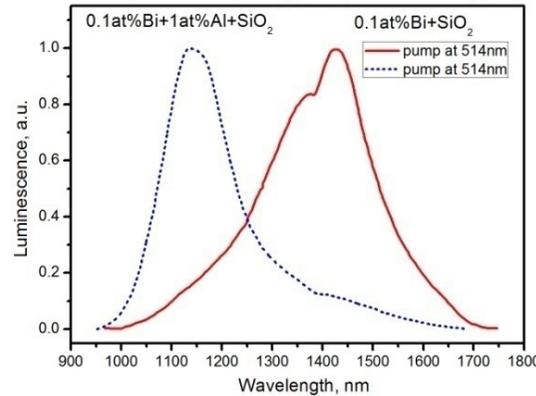
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



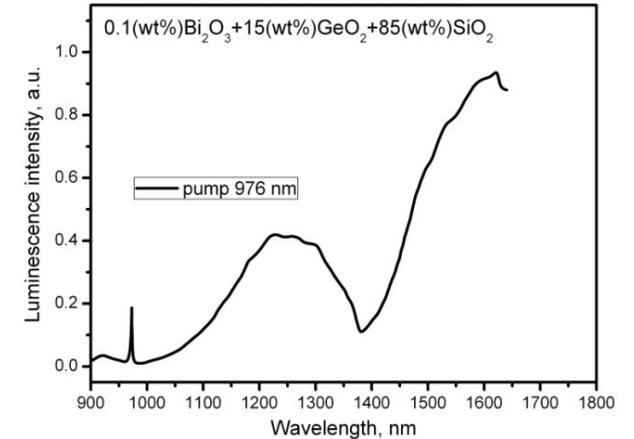
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



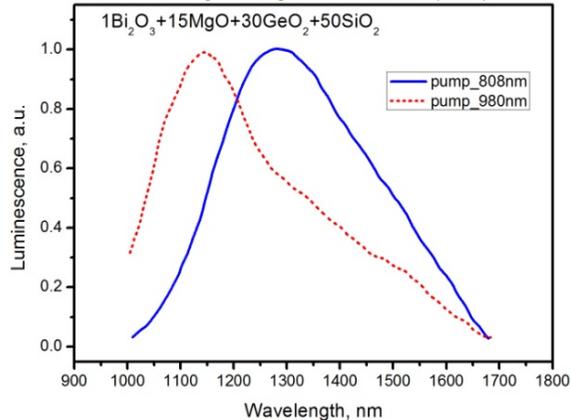
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



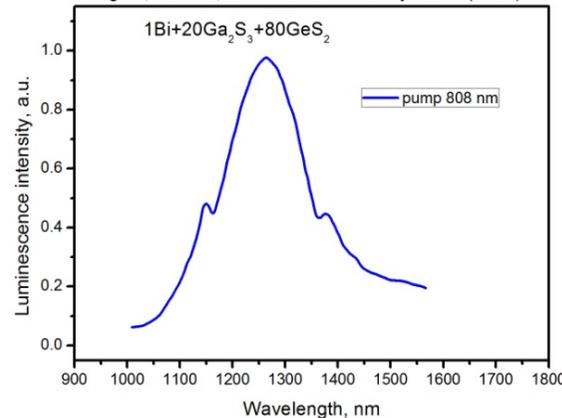
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



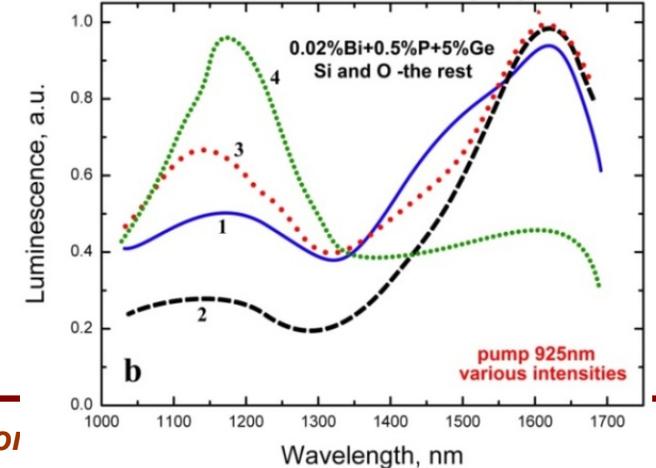
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)

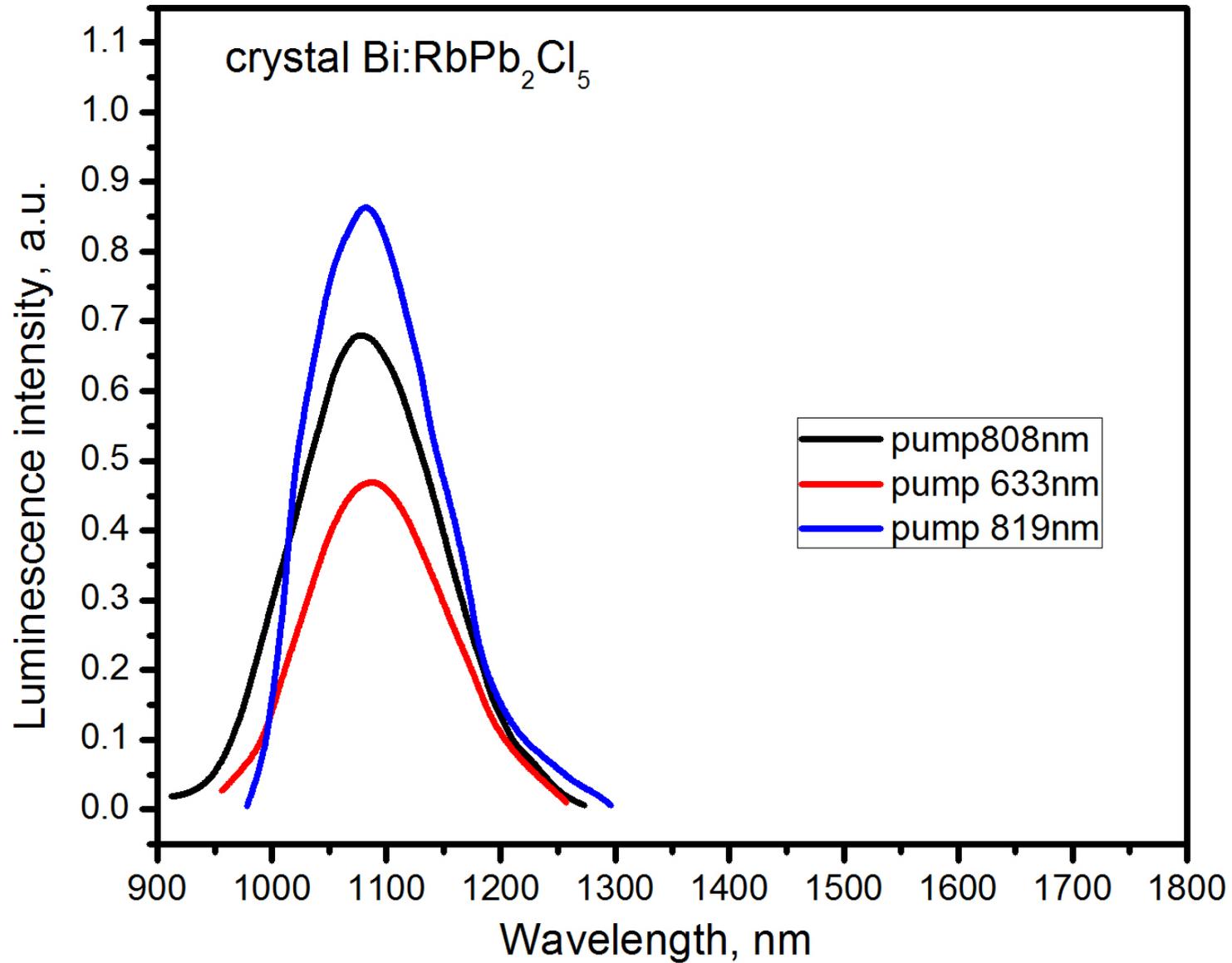


E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)



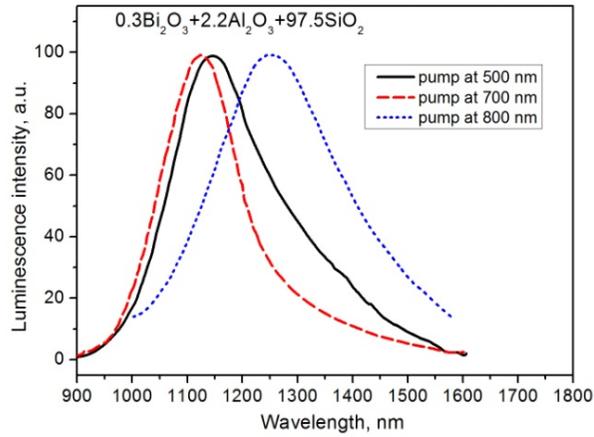
# Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)

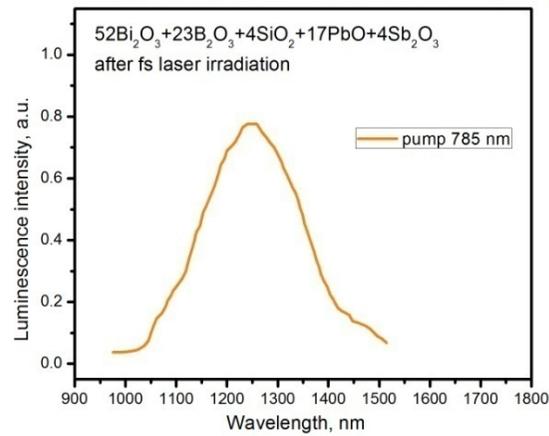


# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

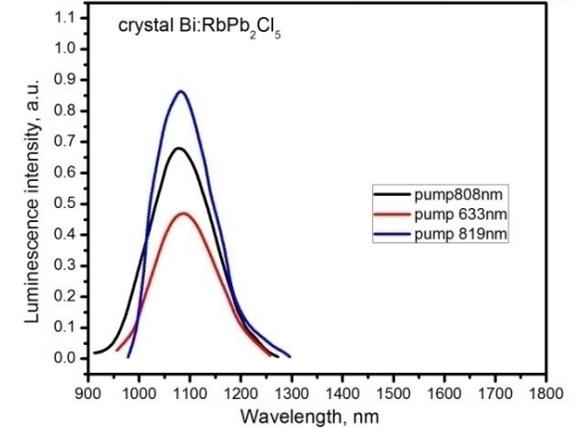
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



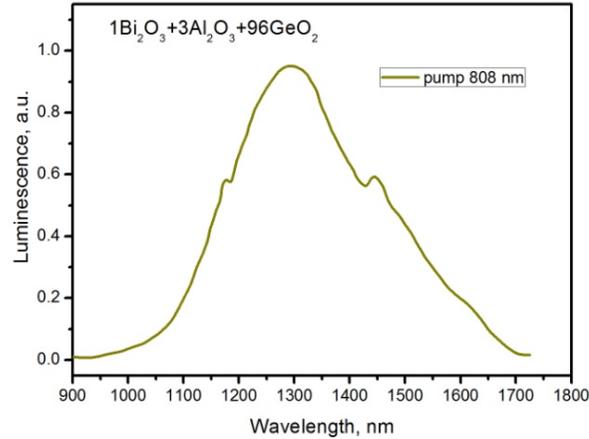
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



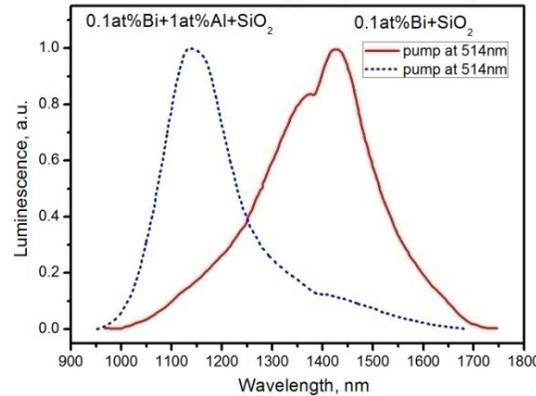
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



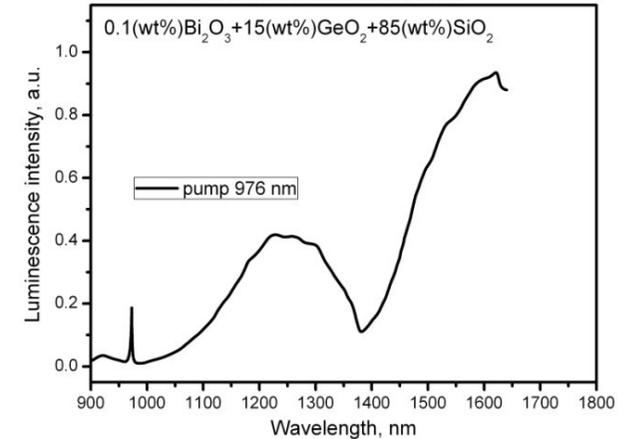
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



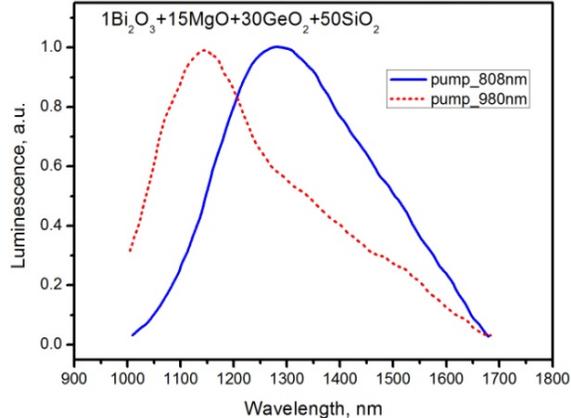
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



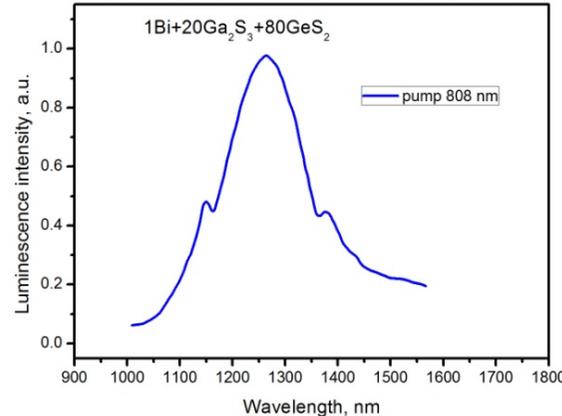
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



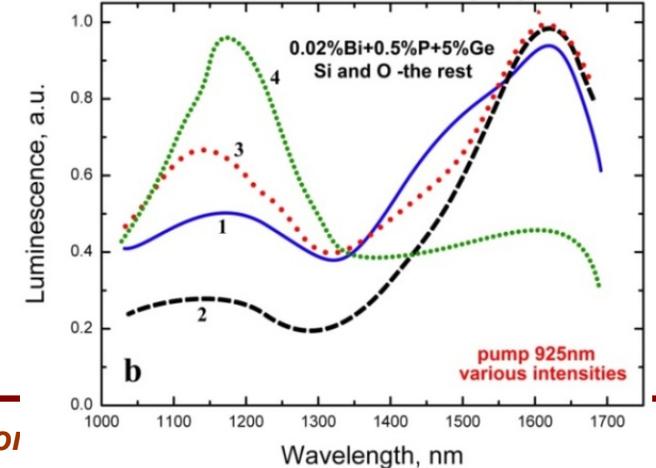
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)

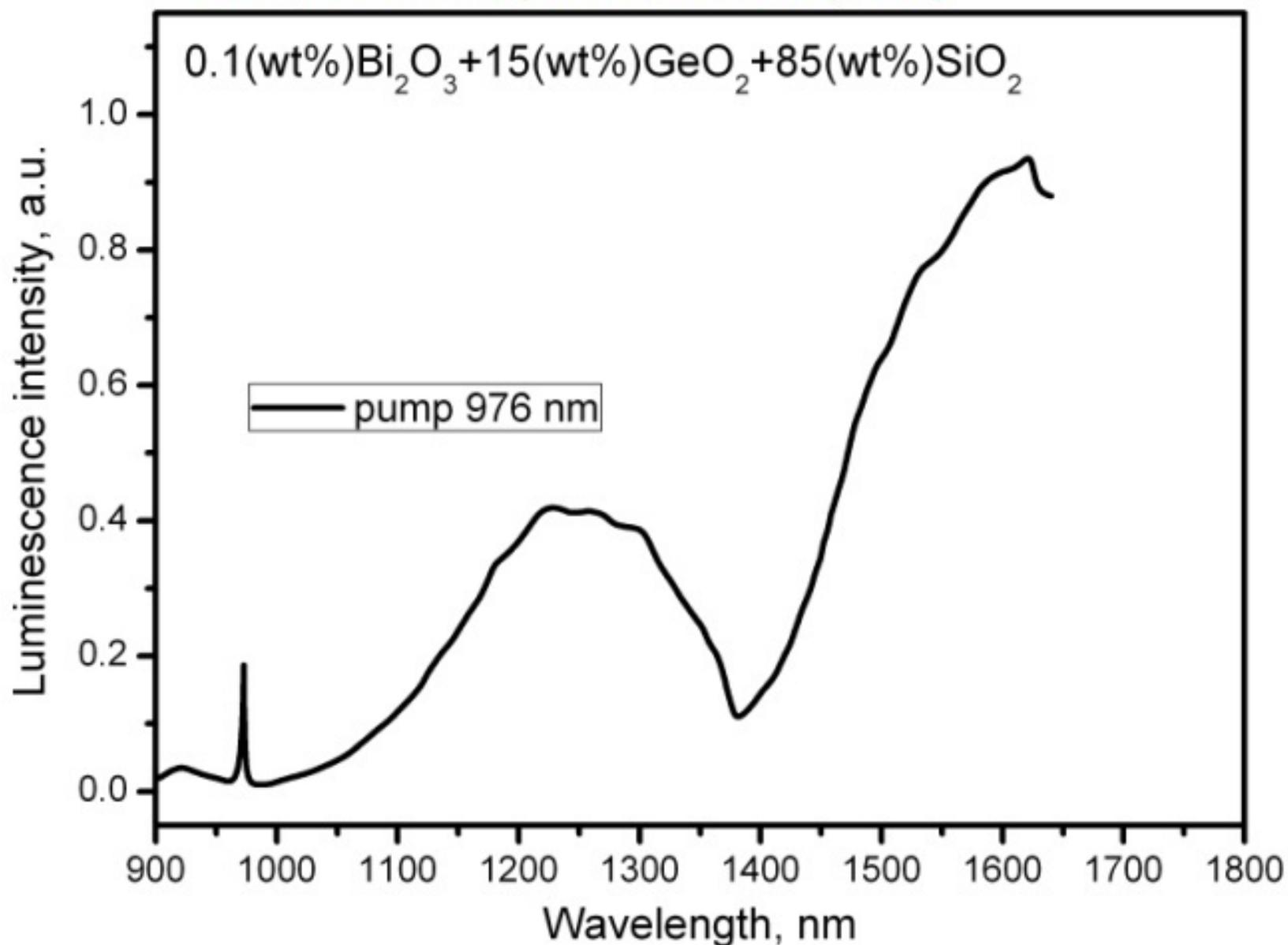


E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)



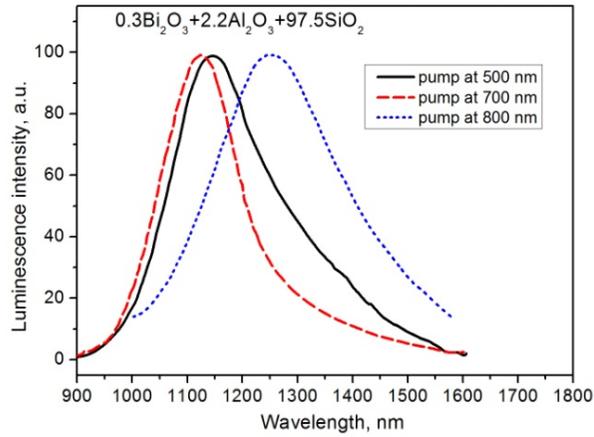
## Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)

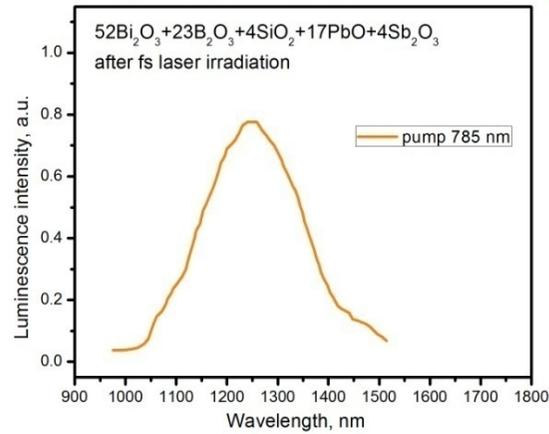


# Bi-doped glass luminescence depends essentially on the glass composition

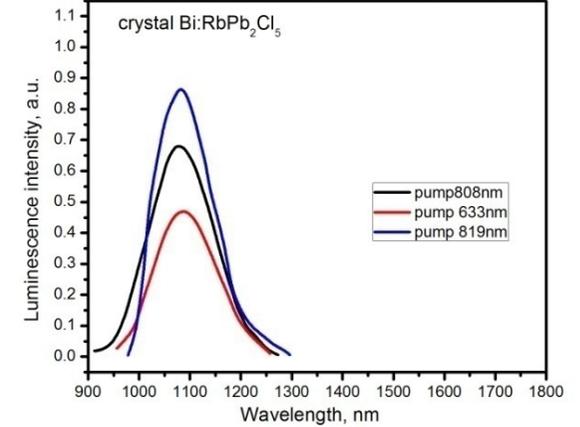
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



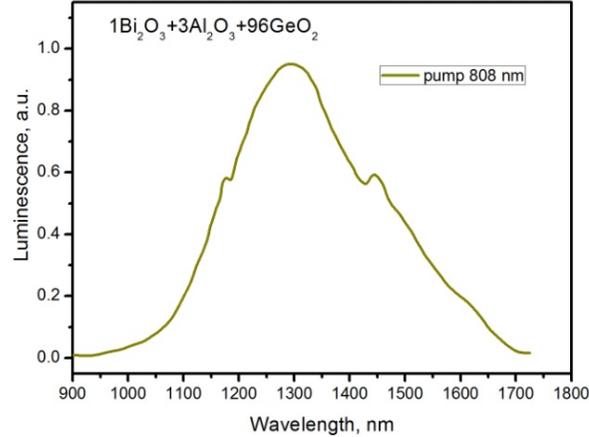
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



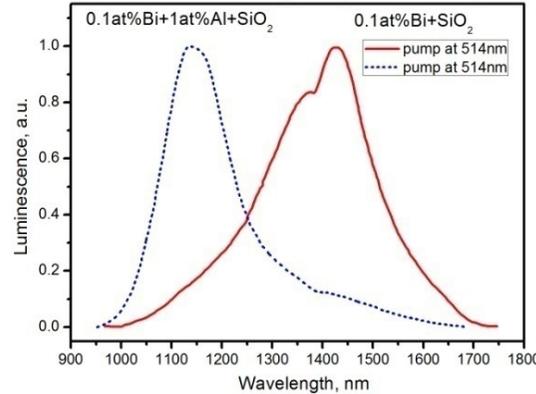
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



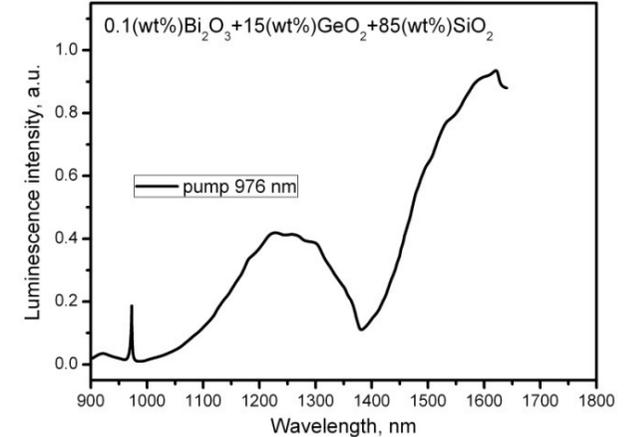
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



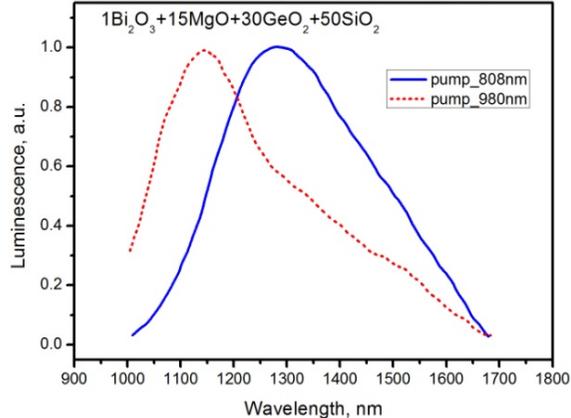
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



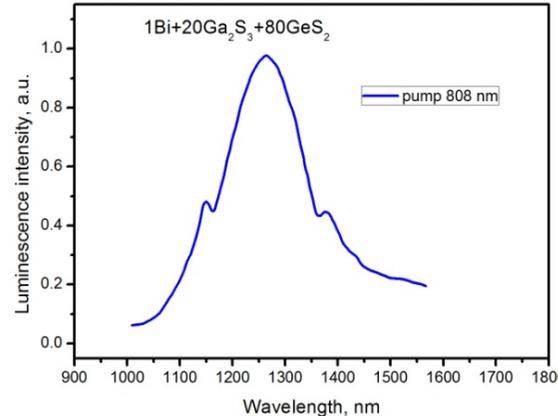
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



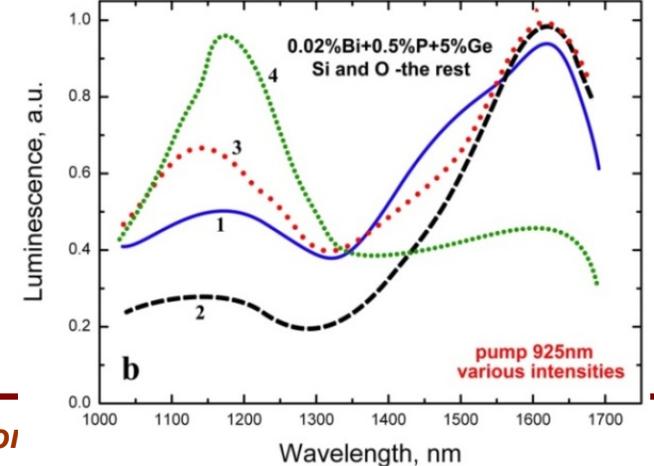
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



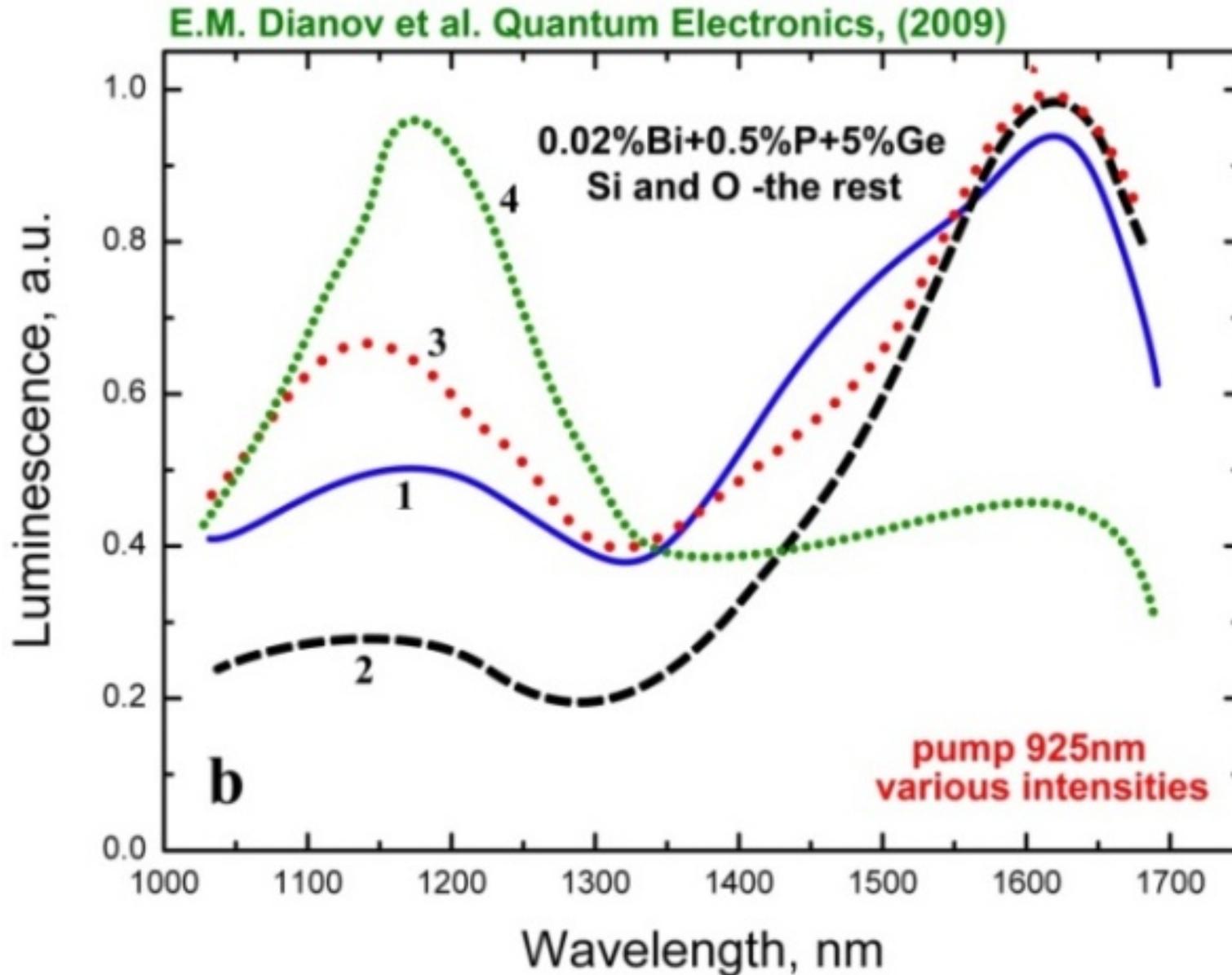
Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)



E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)

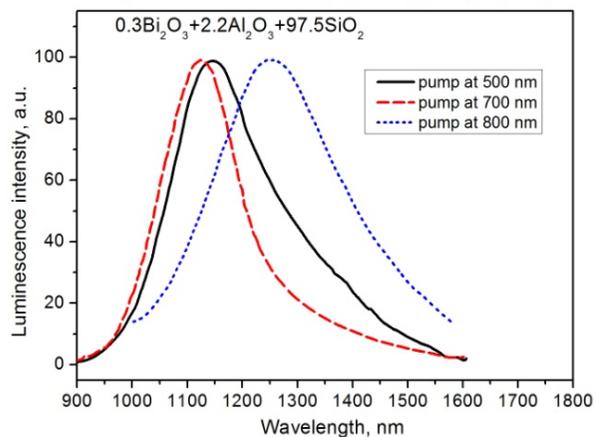


# Bi-doped silica glass luminescence depends essentially on the glass composition

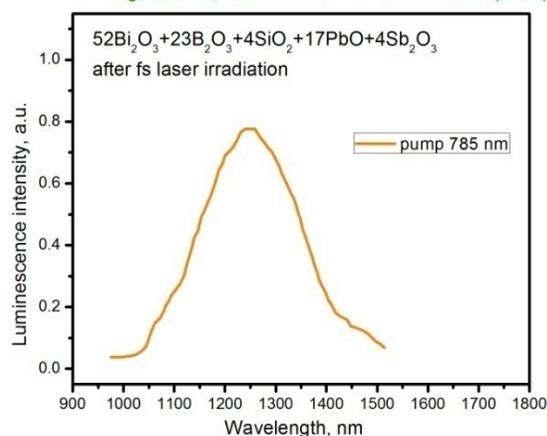


# Зависимость спектров люминесценции от состава матрицы

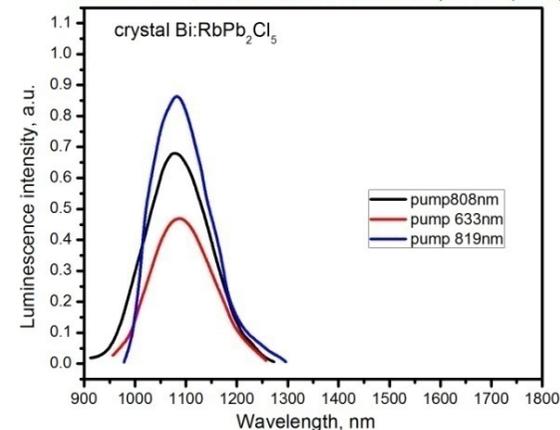
Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. (2001).



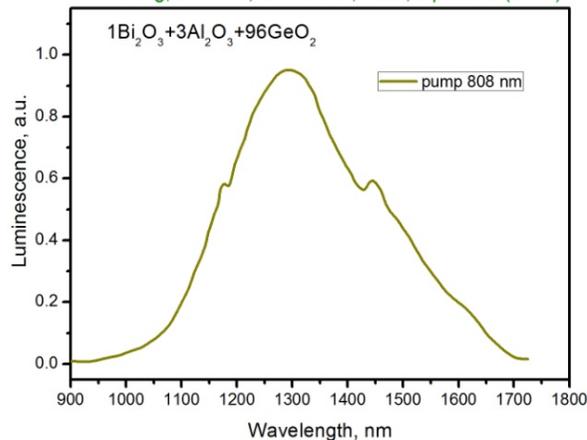
M.Peng, Q.Zhao, J.Qiu et al. J. Am. Ceram. Soc. (2009)



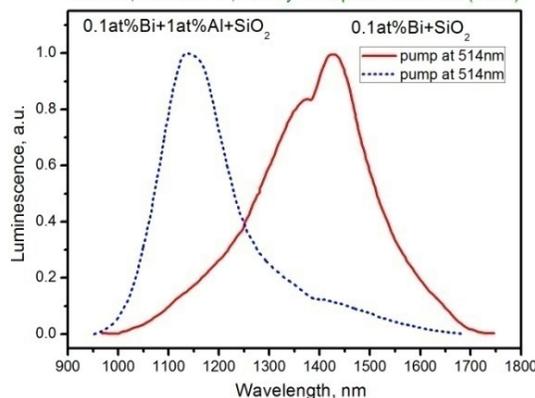
A.Okhrimchuk, L.Butvina, E.Dianov et al. Opt. Lett. (2008)



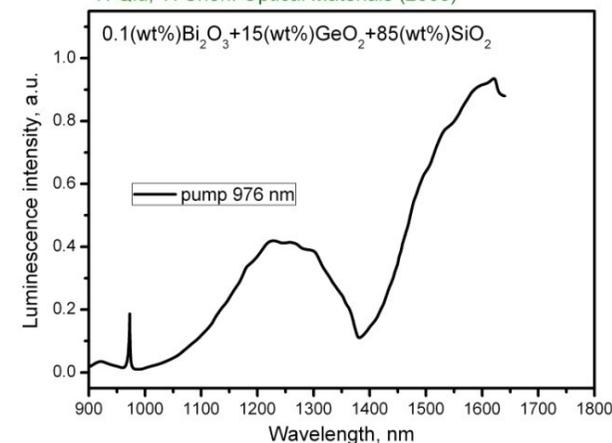
M.Y. Peng, J.R. Qiu, D.P. Chen, et al., Opt. Lett. (2004).



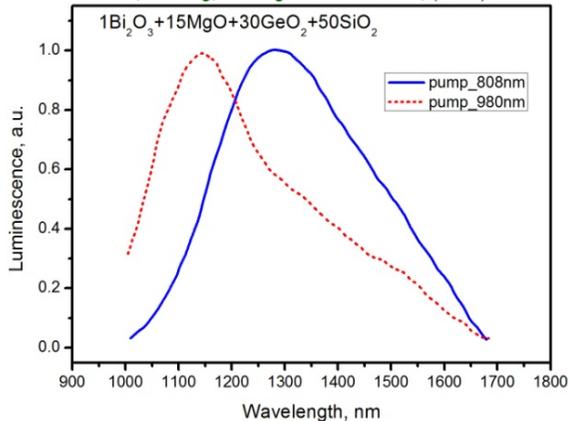
Neff M., Romano V., Luethy W. Optical Materials (2008)



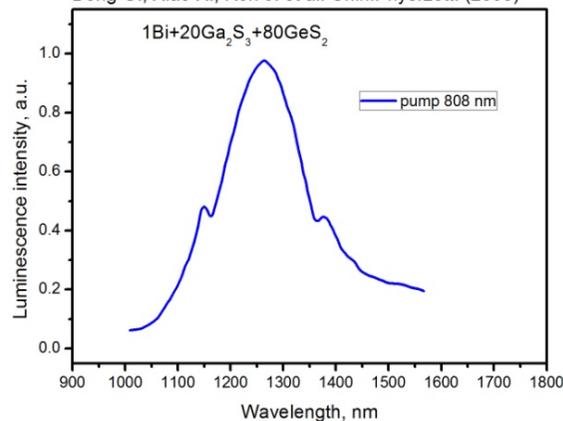
Y. Qiu, Y. Shen. Optical Materials (2008)



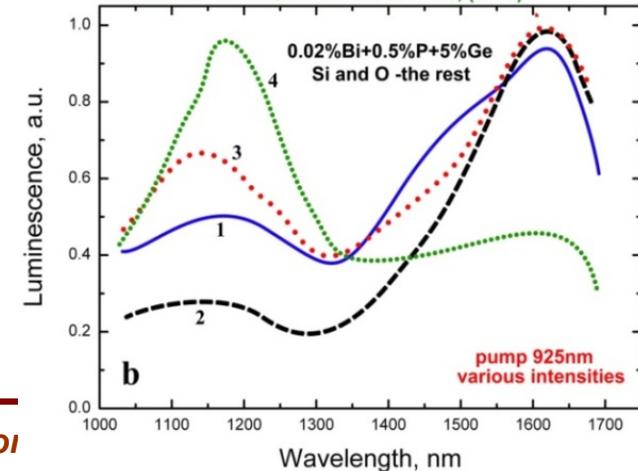
J.Ren, H.Dong, H.Zeng et al. IEEE PTL, (2007)



Dong G., Xiao X., Ren J. et al. Chin.Phys.Lett. (2008)



E.M. Dianov et al. Quantum Electronics, (2009)

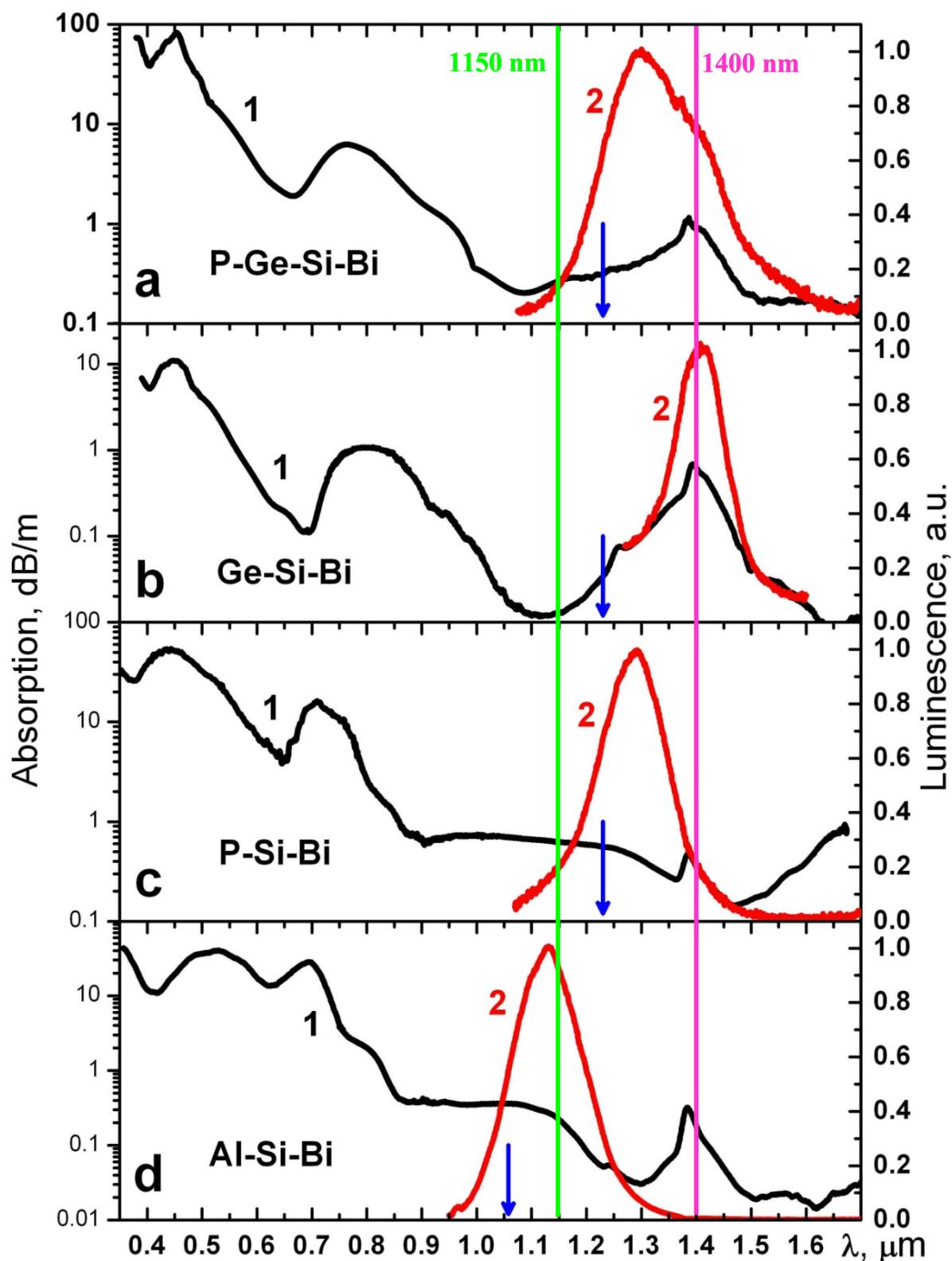


# Содержание

- Введение.
- Люминесцентные свойства стекол и волоконных световодов различных составов, легированных висмутом
- **Люминесцентные свойства перспективных висмутовых волоконных световодов**
- Какова физико-химическая природа висмутовых активных центров?.
- Заключение

# Основные вехи на пути развития висмутовых лазеров

- V.V.Dvoyrin, V.M.Mashinsky, E.M.Dianov et al., ECOC'2005, paper Th3.3.5.
- T.Haruna, M.Kakui, T.Taru et al., OAA'2005, paper MC3.
- **E.M.Dianov et al. “CW bismuth fiber laser”, Quant. Electron. 2005;**  
(first publication)
- I.Razdobreev et al. “Efficient all-fiber bismuth-doped fiber laser”, Appl. Phys. Lett., 2007
- **E.M. Dianov et al., “Bi-doped fiber laser and amplifiers emitting in a spectral region of 1.3  $\mu\text{m}$ ”, Quantum Electronics, 38, 615 (2008)**



	марка	Состав сердцевины, (концентрация в моль%)
a	PGSB	83.5SiO <sub>2</sub> -1.5P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -15GeO <sub>2</sub>
b	GSB	85SiO <sub>2</sub> -15GeO <sub>2</sub>
c	PSB	92.5SiO <sub>2</sub> -7.5P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
d	ASB	97SiO <sub>2</sub> -3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

**Оптические потери (1)**  
**и**  
**Спектры люминесценции (2)**  
 PGSB, PSB, GSB, и ASB  
 световодов.  
**Вертикальными стрелками**  
 отмечены длины волн  
 возбуждения.

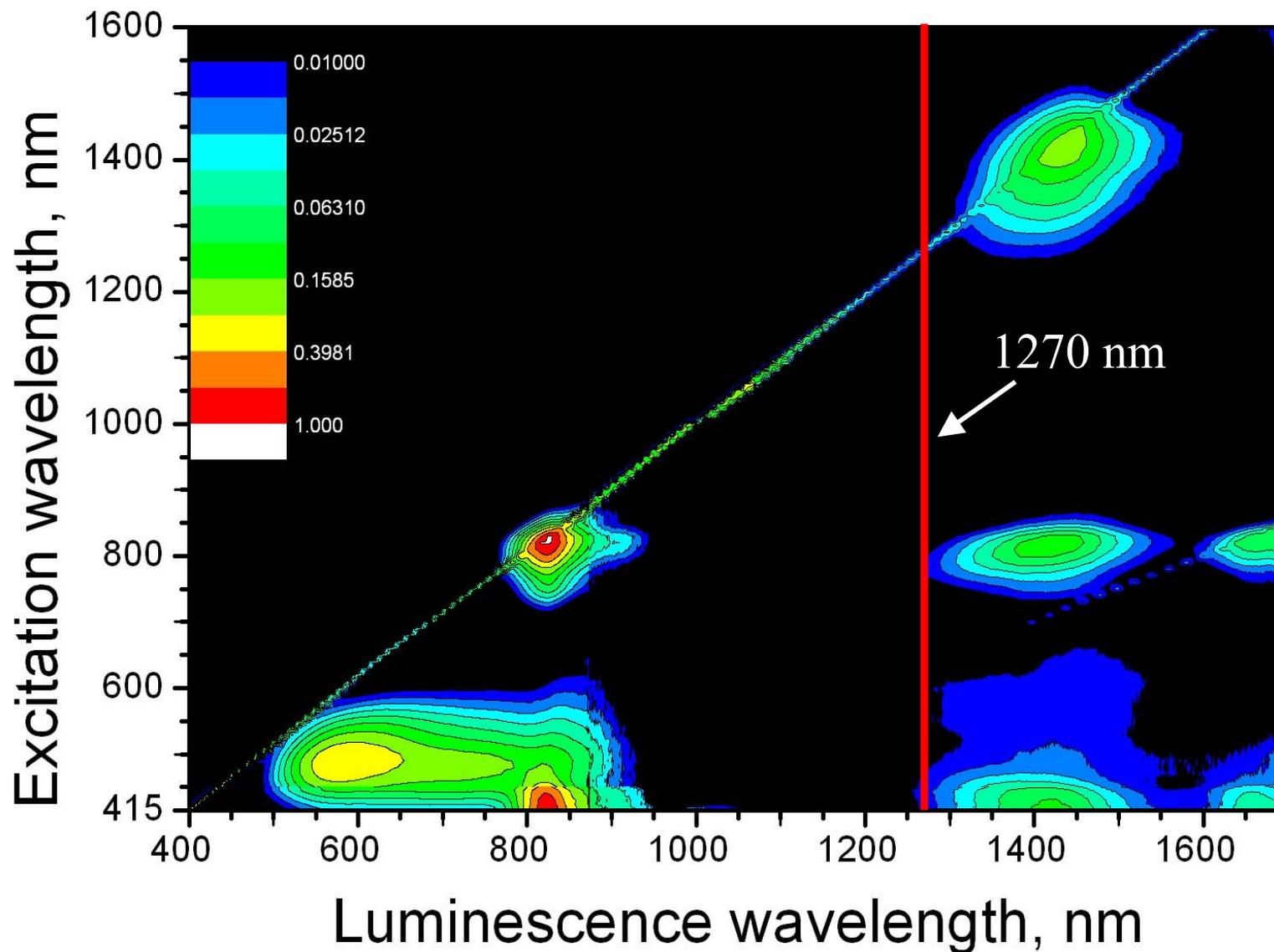
Dianov et al., OFC'2009

Изучение висмутовых активных центров в волоконных световодах хорошо начинать с наиболее простого состава сердцевины. Одина из возможностей - это

волоконные световоды с легированной висмутом сердцевиной из кварцевого стекла без дополнительных легирующих добавок:  
**(100SiO<sub>2</sub>+ ε·Bi)**

- 1.- Neff M., Romano V., Luethy W. Opt. Mater., 31, 247 (2008)
- 2.- Razdobreev I., Hamzaoui H.El., Ivanov V.Yu., Kustov E.F., Capoen B., Bouazaoui M. Opt. Lett., 35, 1341 (2010).
- 3.- I.A. Bufetov, S.L. Semenov, V.V. Vel'miskin et al., "Optical properties of active bismuth centres in silica fibres containing no other dopants", Quantum Electron., 40(7), pp.639-641 (2010)
- 4.- I. Razdobreev, H. El Hamzaoui, L. Bigot, A. Arion, G.Bouwman, A. Le Rouge, and M. Bouazaoui, Opt. Express 18, 19479 (2010).
- 5.- I.A. Bufetov, M.A. Melkumov, S.V. Firstov et al. "Optical gain and laser generation in bismuth-doped silica fibers free of other dopants", Optics letters, Vol. 36, No. 2, 166-168 (2011)

# Трёхмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции световода на основе чистого кварцевого стекла, легированного висмутом



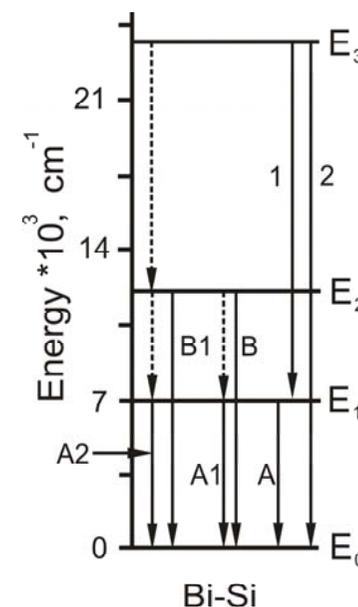
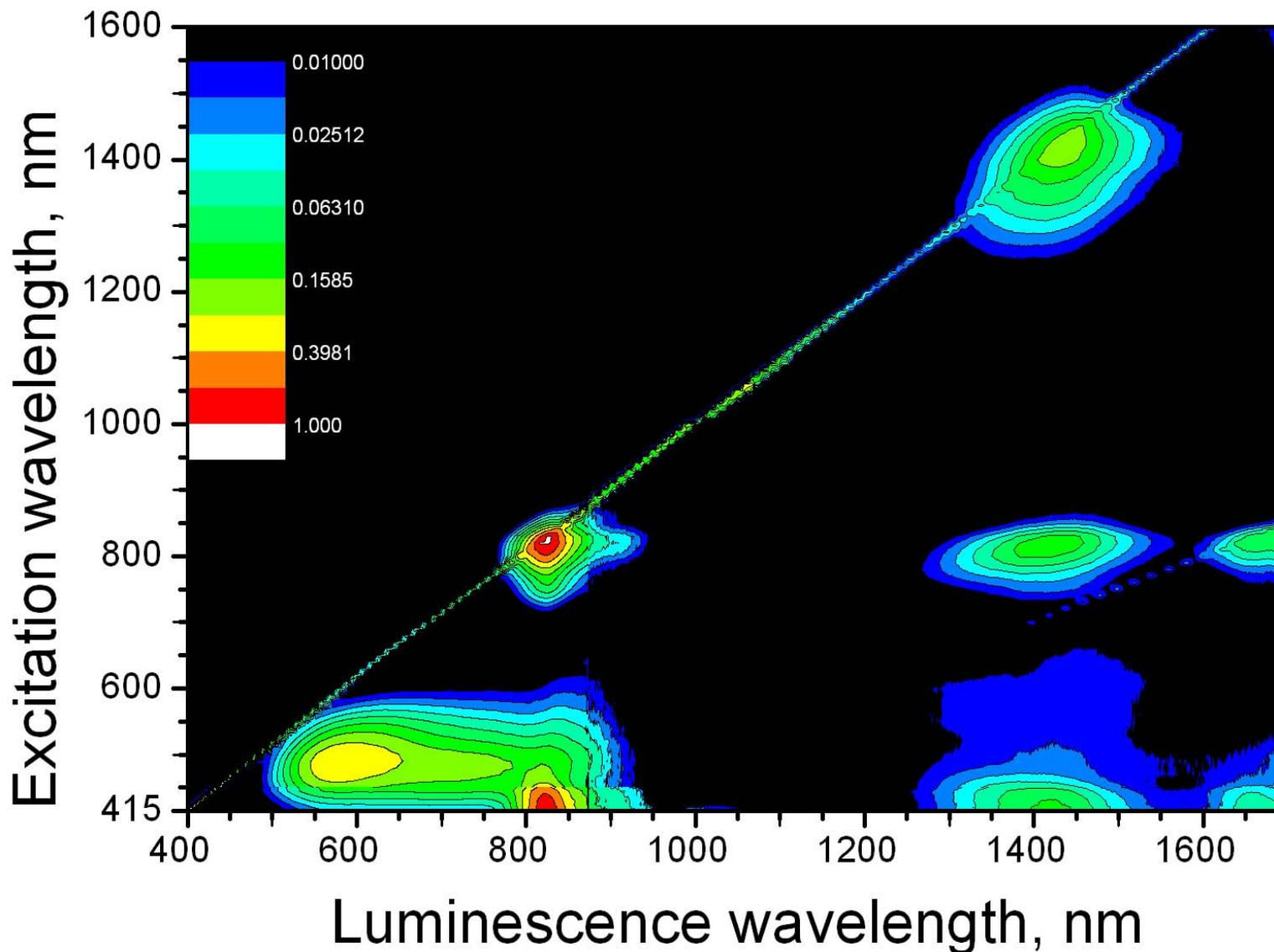
С.В.Фирстов и др.  
arXiv:1106.2969v1[physics. optics] submitted on 15 Jun 2011;

S.V.Firstov et al.  
Optics Express, Sept., (2011).

На 3D графиках люминесценции максимальный перепад интенсивности люминесценции не более 2 порядков

# Трехмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции световода на основе чистого кварцевого стекла, легированного висмутом

$$I_{lum}(\lambda_{em}, \lambda_{ex})$$

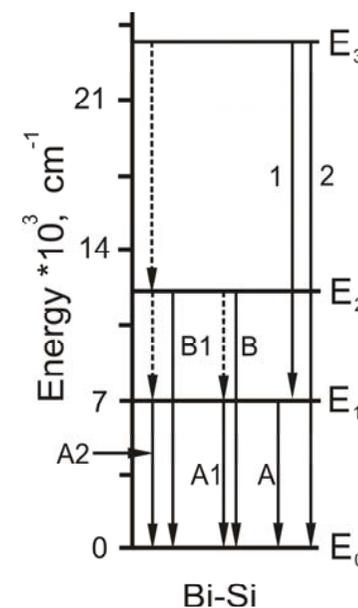
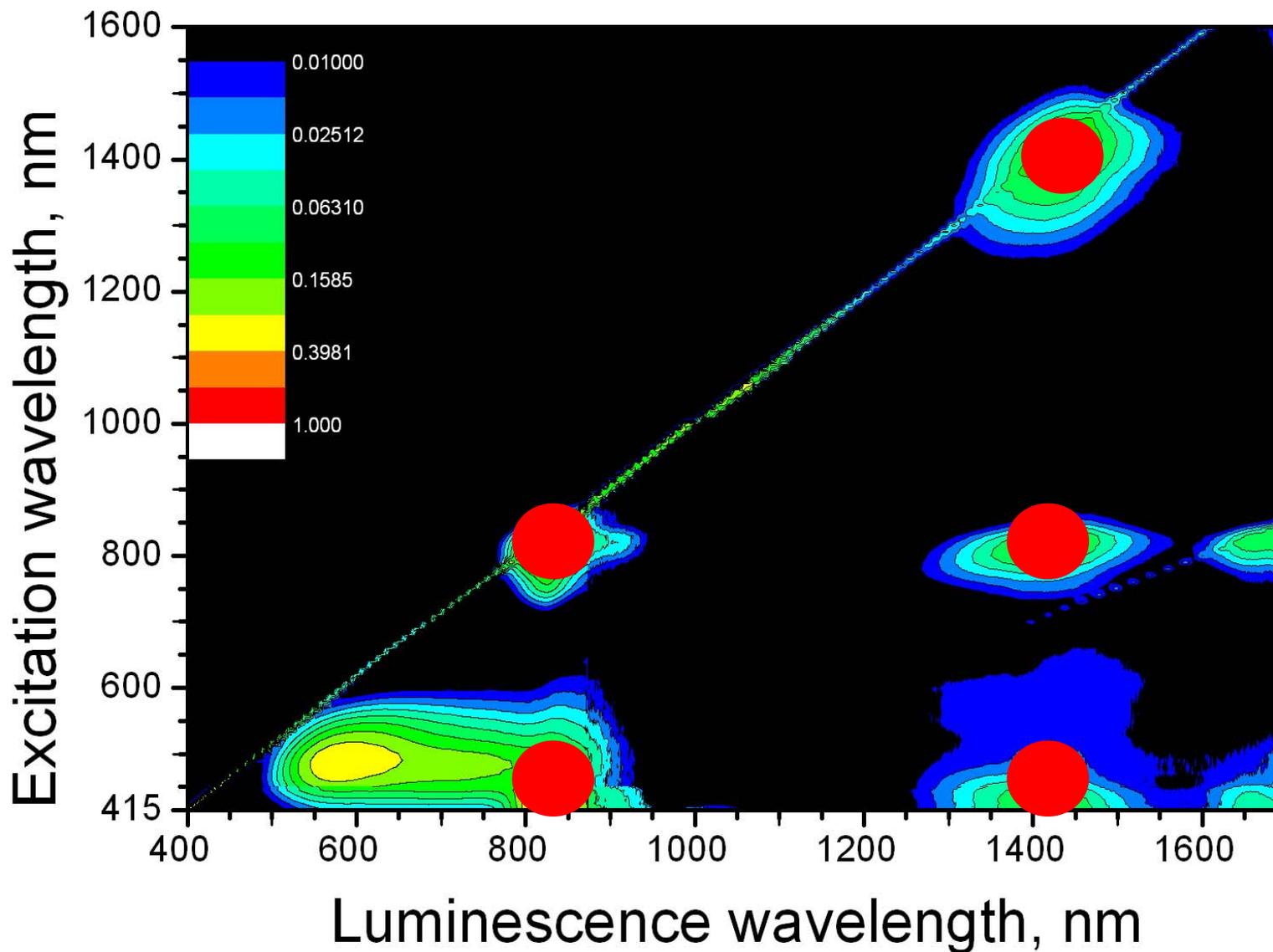


I.A. Bufetov, E.M. Dianov et al. *Opt. Lett.*, 36(2), 166 (2011)

S.V. Firstov, I.A. Bufetov et al. *CLEOEurope2011*, PDA.7

# Трехмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции световода на основе чистого кварцевого стекла, легированного висмутом

$$I_{lum}(\lambda_{em}, \lambda_{ex})$$

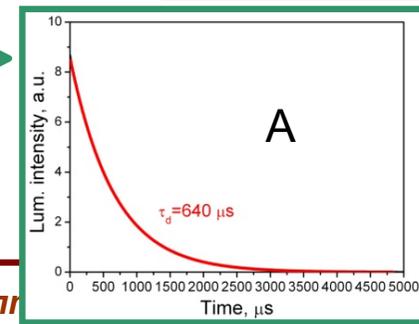
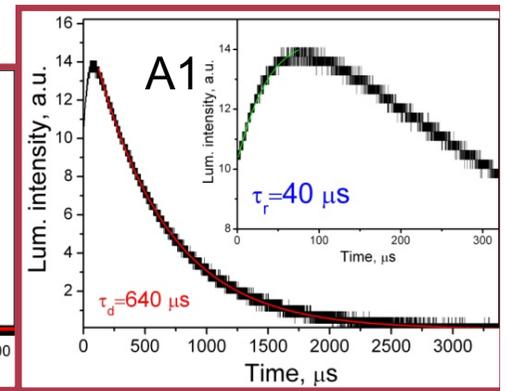
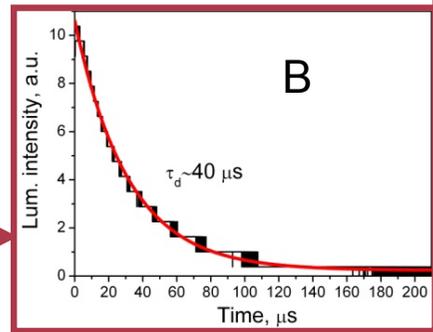
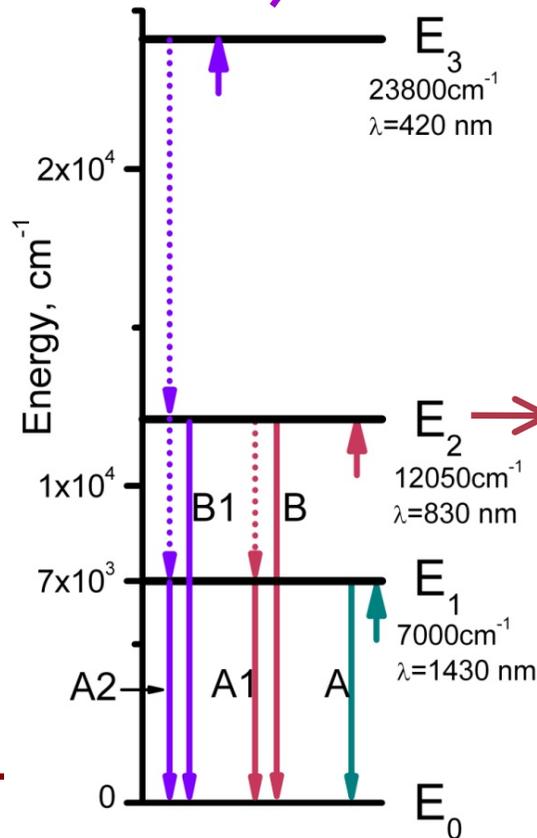
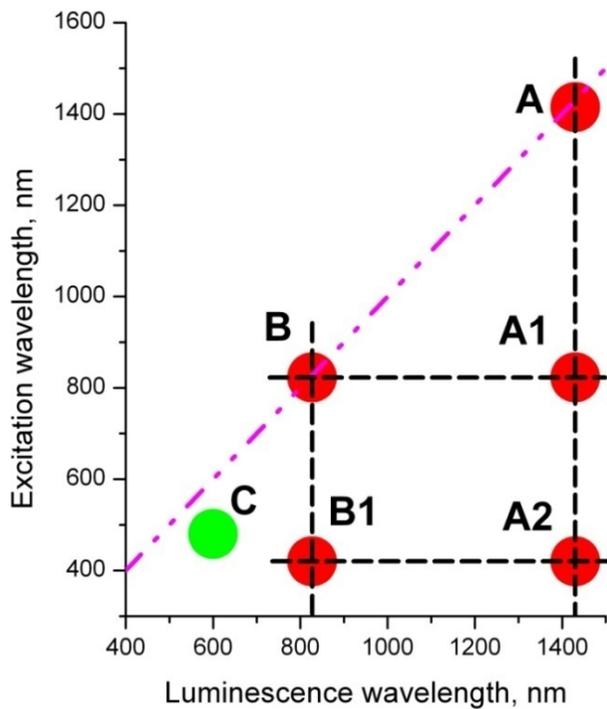
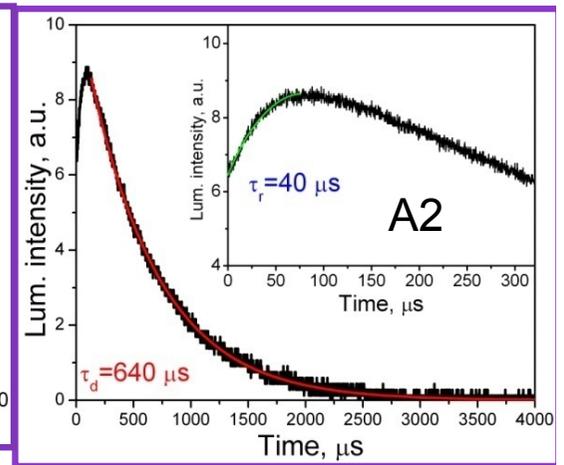
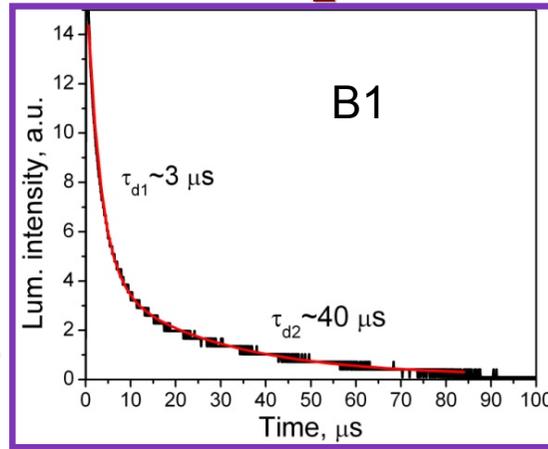
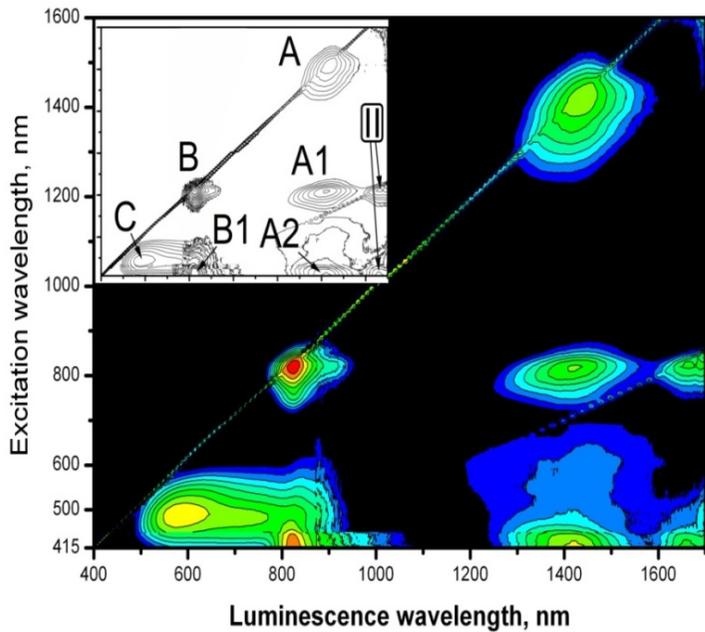


I.A. Bufetov, E.M. Dianov et al. *Opt. Lett.*, 36(2), 166 (2011)

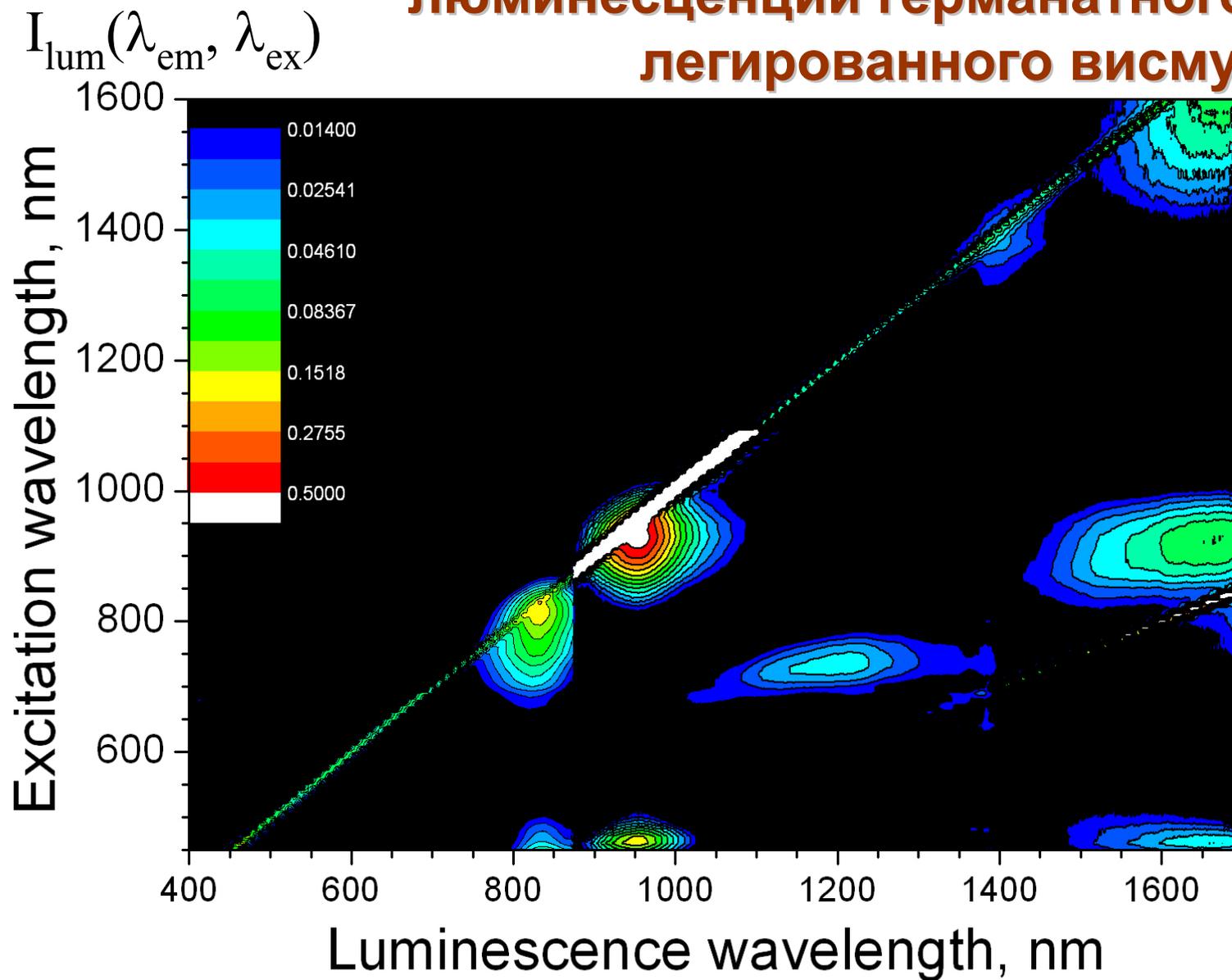
S.V. Firstov, I.A. Bufetov et al. *CLEOEurope2011*, PDA.7

● -SiO<sub>2</sub>-Bi активный центр

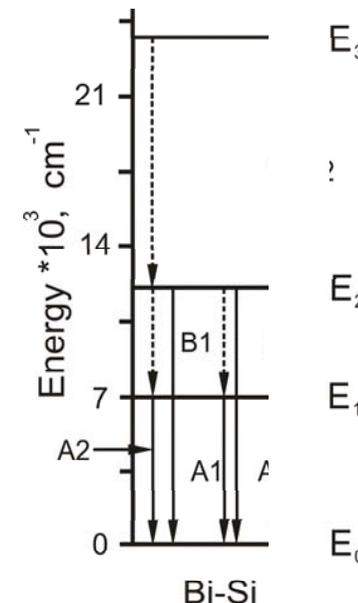
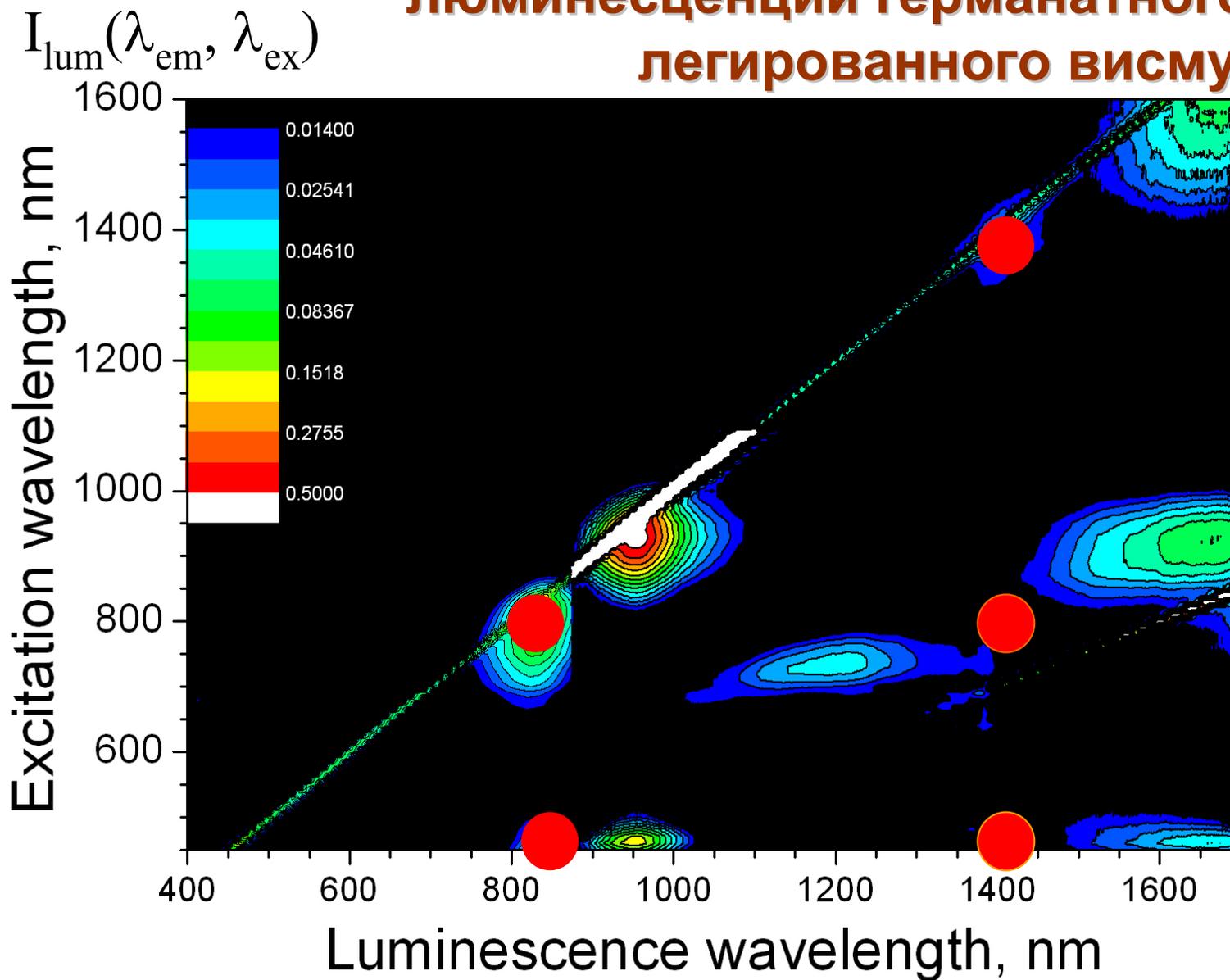
# Кинетики и времена люминесценции висмутовых активных центров в $\text{Bi:SiO}_2$ световодах



# Трёхмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции германатного световода, легированного висмутом

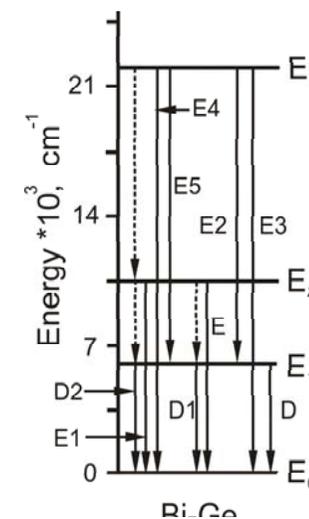
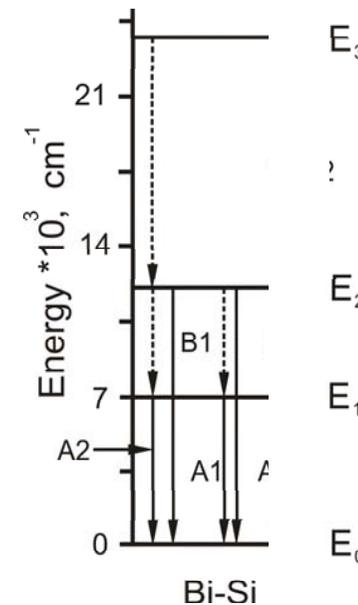
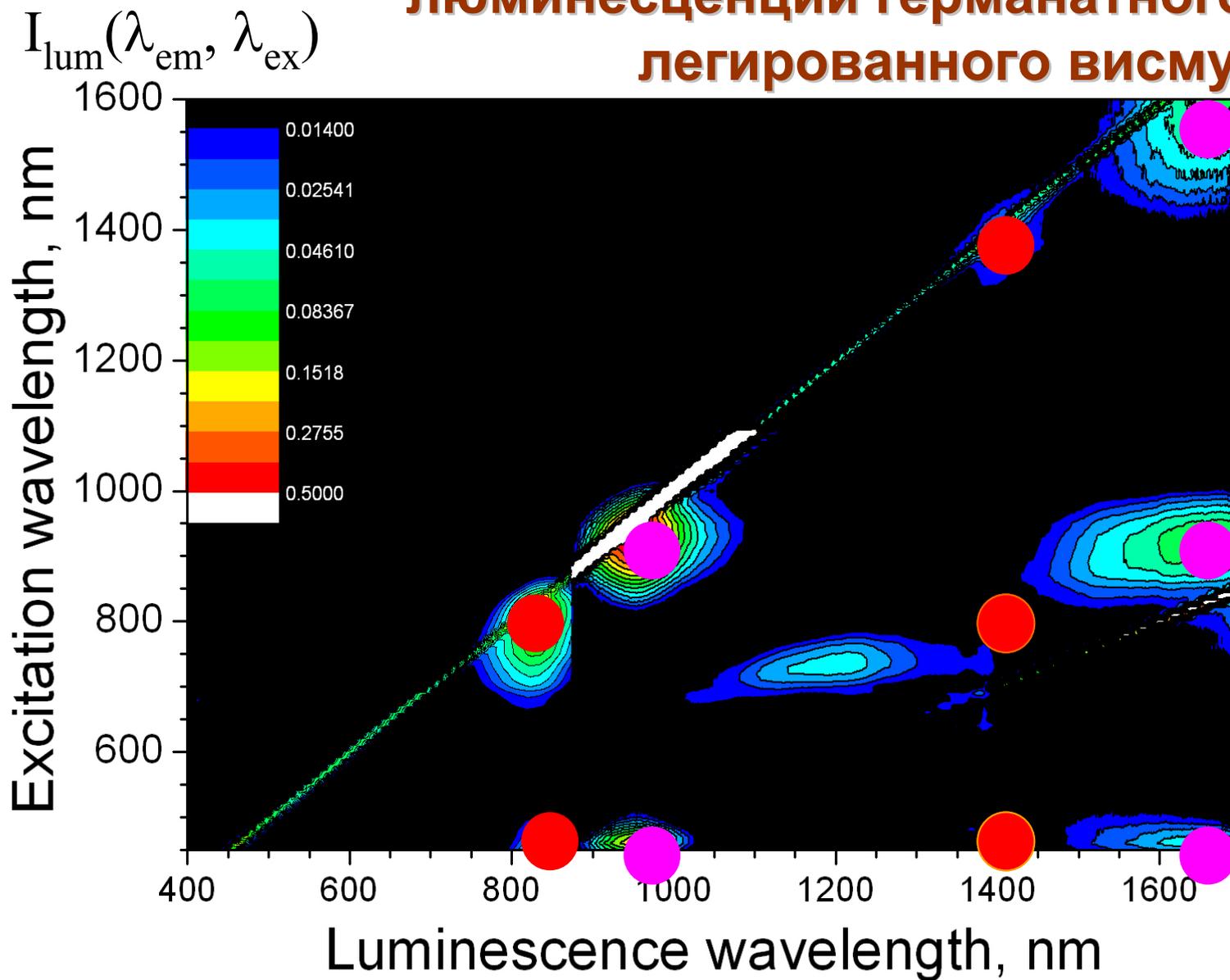


# Трёхмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции германатного световода, легированного висмутом



●  $-\text{SiO}_2\text{-Bi}$  активный центр

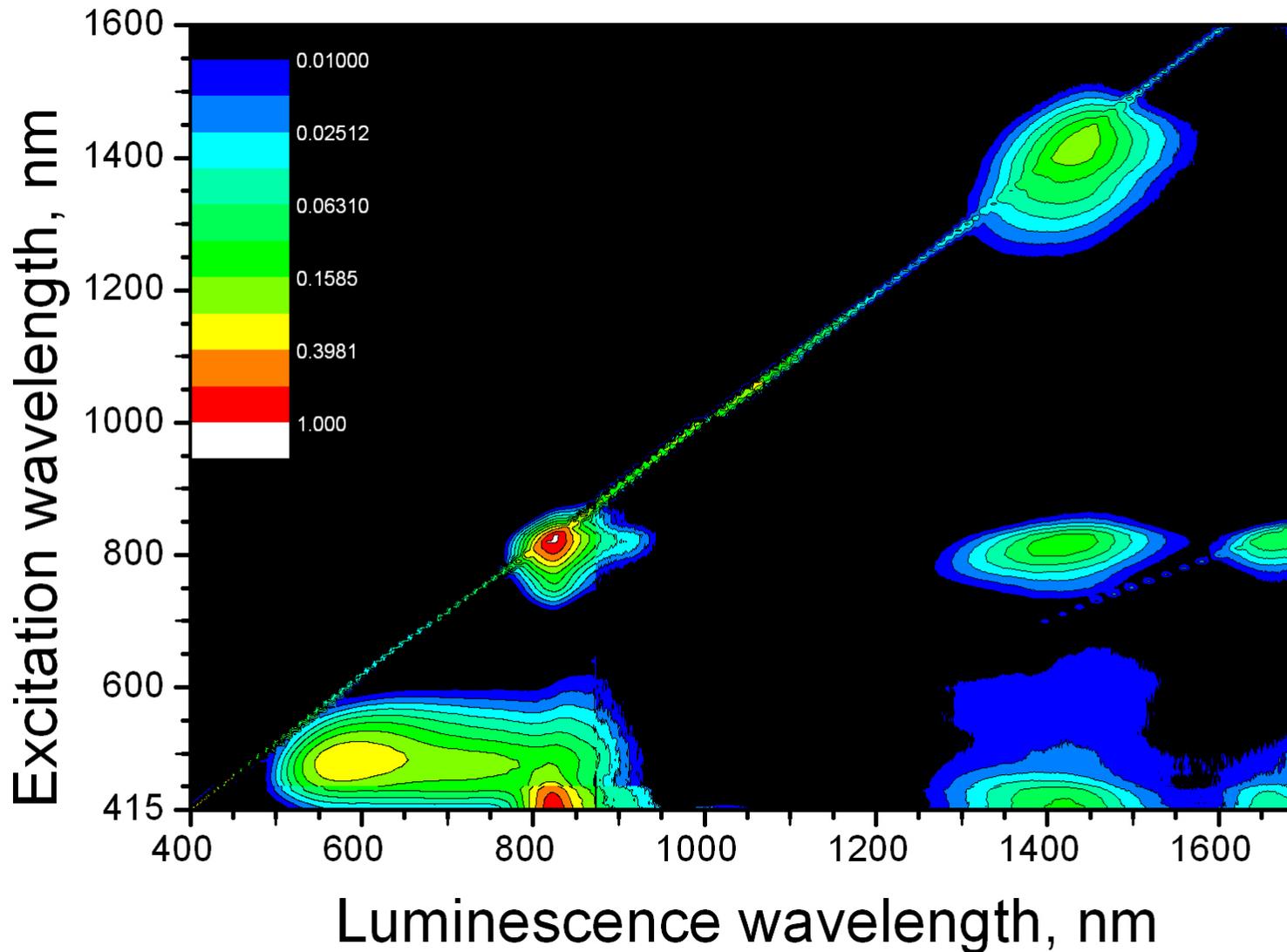
# Трёхмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции германатного световода, легированного висмутом



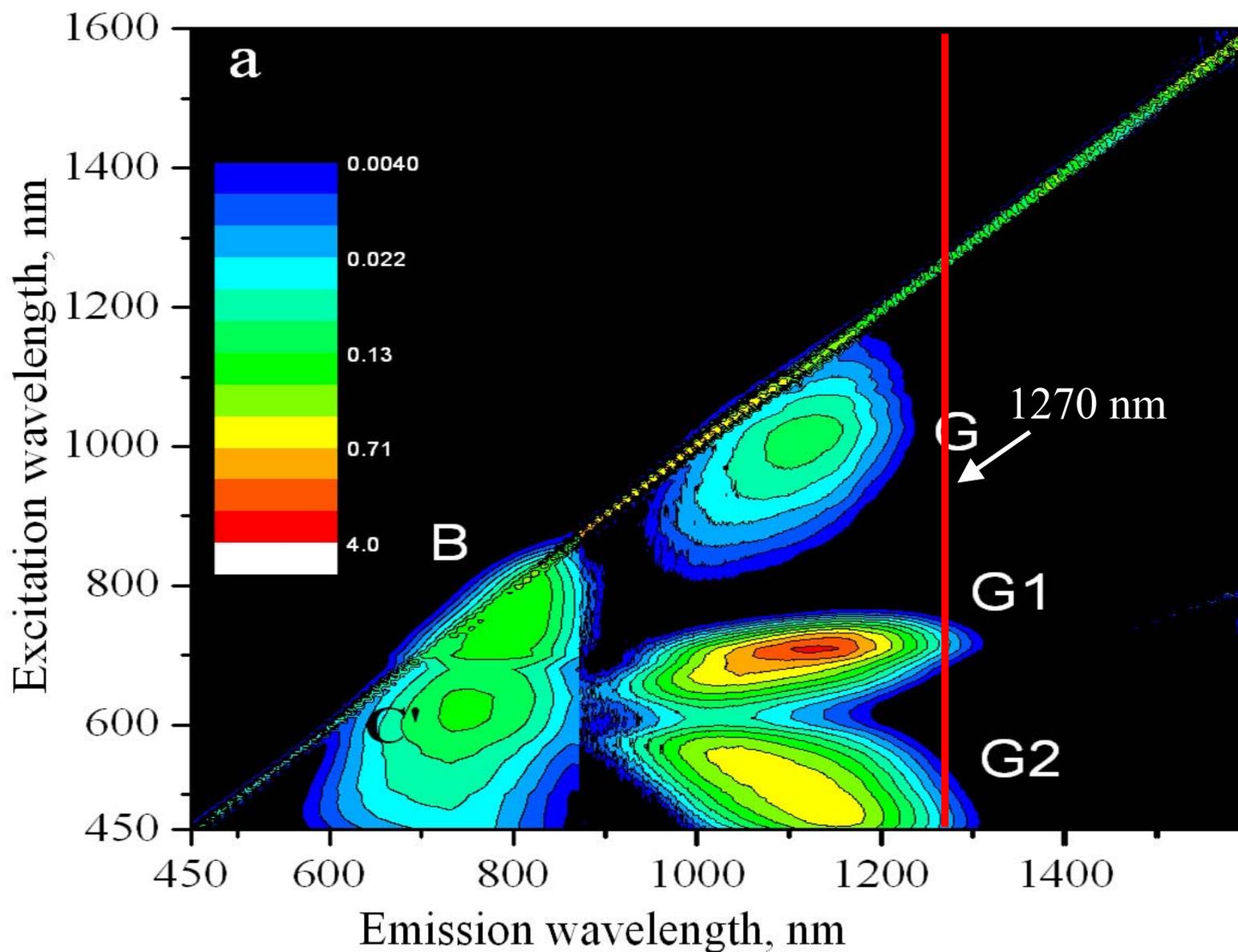
● -SiO<sub>2</sub>-Bi активный центр

● -GeO<sub>2</sub>-Bi активный центр

# Трёхмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции световода на основе чистого кварцевого стекла, легированного висмутом

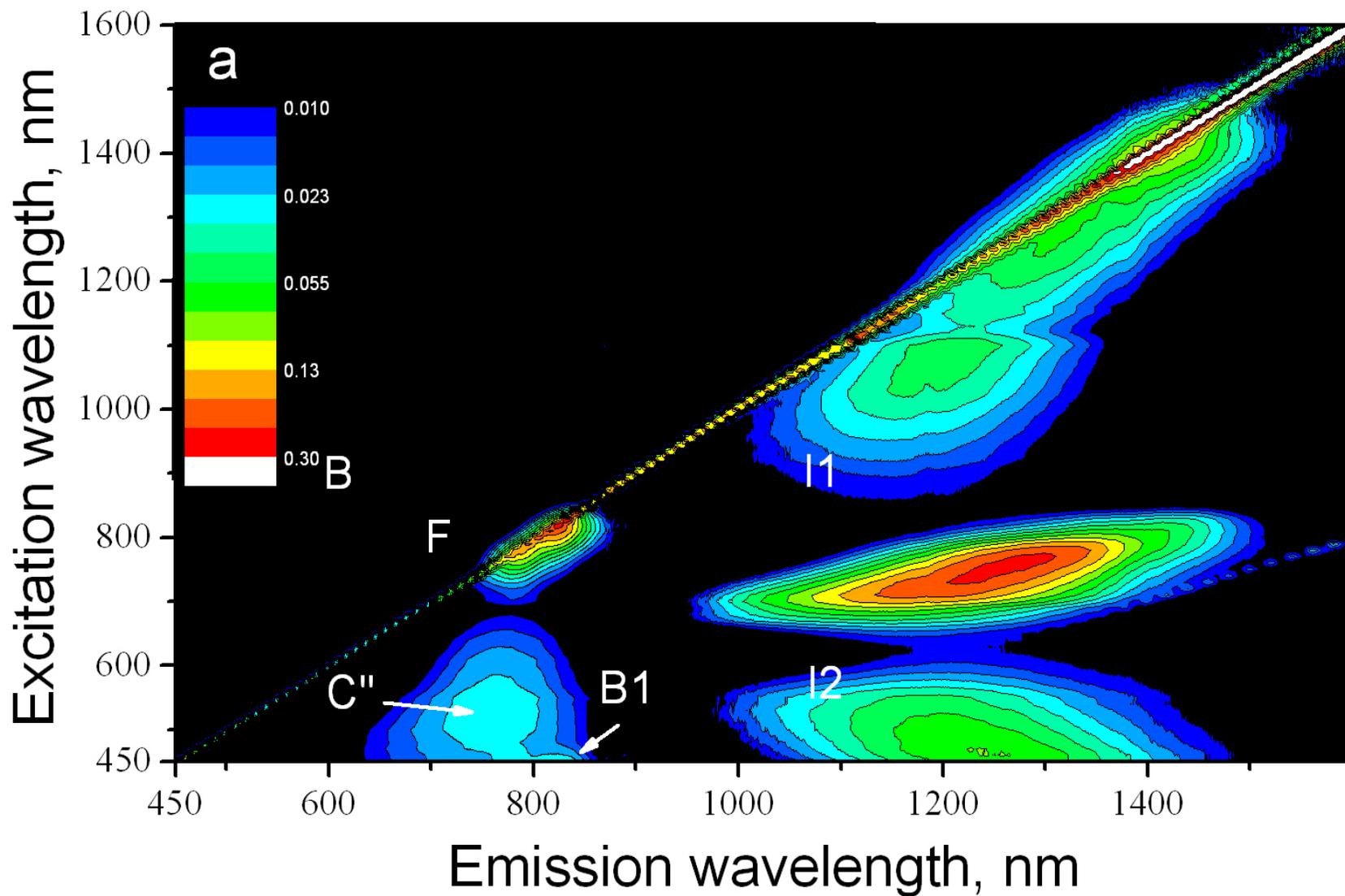


# Трёхмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции алюмосиликатного световода, легированного висмутом



# Трёхмерный спектр возбуждения-эмиссии люминесценции фосфоросиликатного световода, легированного висмутом

$$I_{\text{lum}}(\lambda_{\text{em}}, \lambda_{\text{ex}})$$



# Содержание

- Введение.
- Люминесцентные свойства стекол и волоконных световодов различных составов, легированных висмутом
- Люминесцентные свойства перспективных висмутовых волоконных световодов
- Какова физико-химическая природа висмутовых активных центров? .
- Заключение

# Какова природа висмутовых активных центров, люминесцирующих в ИК диапазоне?

- $\text{Bi}^{5+}$  - Fujimoto and Nakatsuka, 2001
- $\text{Bi}^+$  - X. Meng et al., 2005, Sh.Zhou et al. 2008, L.Su et al., 2009
- $\text{BiO}$  – J. Ren et al., 2006
- $\text{Bi}_2$ ,  $\text{Bi}_2^-$ ,  $\text{Bi}_2^{2-}$  - Khonthon et al., 2007; Sokolov et al., 2008, Denker et al., 2009
- Point defects – Sharonov et al., 2008, in glass Lakshminarayana et al., 2009

•  $\text{Bi}^{5+}$  - Fujimoto and Nakatsuka, 2001

1-отсутствуют переходы в области 1400нм

2-при нагревании с кислородом ИК люминесценция пропадает

⇒ предположение, скорее всего, неверно.  $\text{Bi}^{5+}$

•  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Bi}^{2+}$  - обычно не рассматриваются

1-ИК люминесценция не наблюдается в стеклах с большой концентрацией  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -в висмутатных стеклах ⇒  $\text{Bi}^{3+}$

2-  $\text{Bi}^{2+}$  отсутствуют переходы в области 1400нм

⇒  $\text{Bi}^{2+}$

•  $\text{Bi}_2$ ,  $\text{Bi}_2^-$ ,  $\text{Bi}_2^{2-}$  - Khonthon et al., 2007; Sokolov et al., 2008, Denker et al., 2009

1-”за”- обнаруженная квадратичная зависимость оптического поглощения в полосах висмутового активного центра от концентрации висмута.

2-квантовомеханические расчеты - используемые программы, по-видимому, не могут адекватно считать схемы с тяжелыми атомами с j-j связью (есть расхождения с экспериментальными данными).

Предложенная схема (на рисунке, например) не соответствует используемым концентрациям алюминия.

⇒ предположение, скорее всего, неверно?

Кроме того, в экспериментах наблюдается гораздо более сильная зависимость спектра люминесценции от состава световода, чем получающаяся из расчетов.

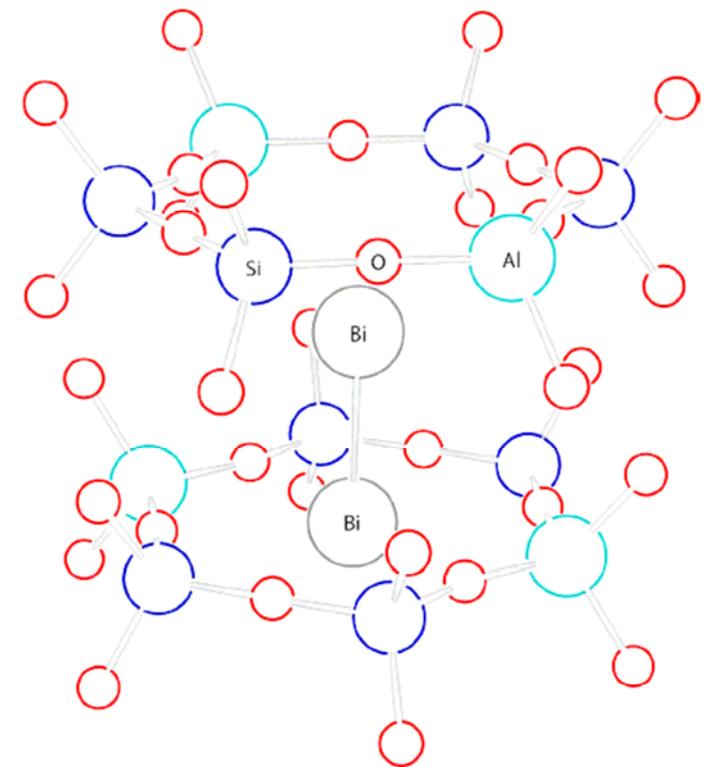


Fig. 3. (Color online)  $\text{Bi}_2$  or  $\text{Bi}_2^{2-}$  dimer in an aluminosilicate network.

# Spectroscopic study of optical centers formed in Bi-, Pb-, Sb-, Sn-, Te-, and In-doped germanate glasses

M. Yu. Sharonov,\* A. B. Bykov, V. Petricevic, and R. R. Alfano

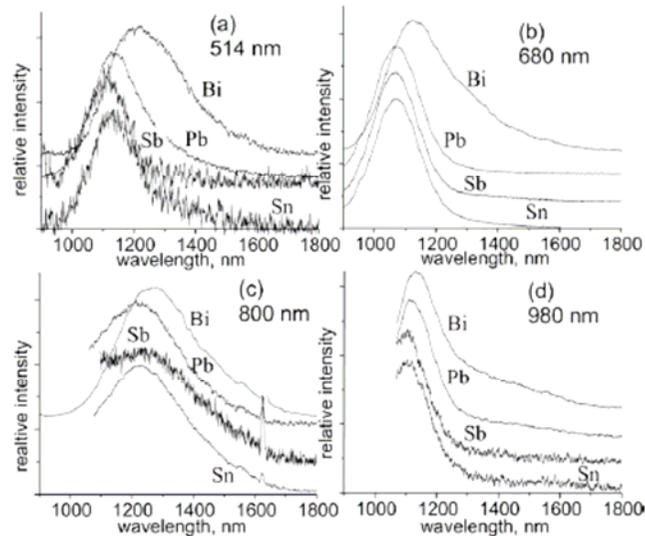


Fig. 1. Fluorescence spectra of germanate glasses doped with 1 mol.% of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SnO}_2$ , and  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  and codoped with 12 mol.% of  $\text{AlF}_3$  on excitation at (a) 514, (b) 680, (c) 800, and (d) 980 nm. The plots are vertically shifted for clarity; fluorescence intensity is about zero at 1800 nm for all samples.

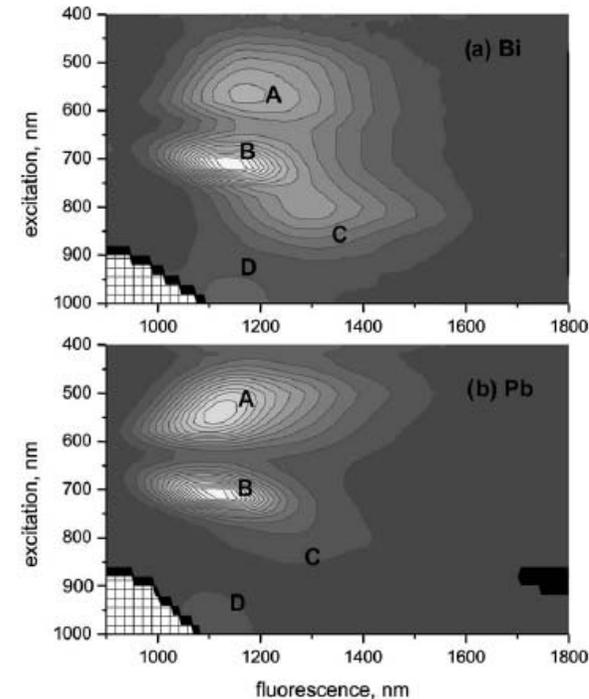
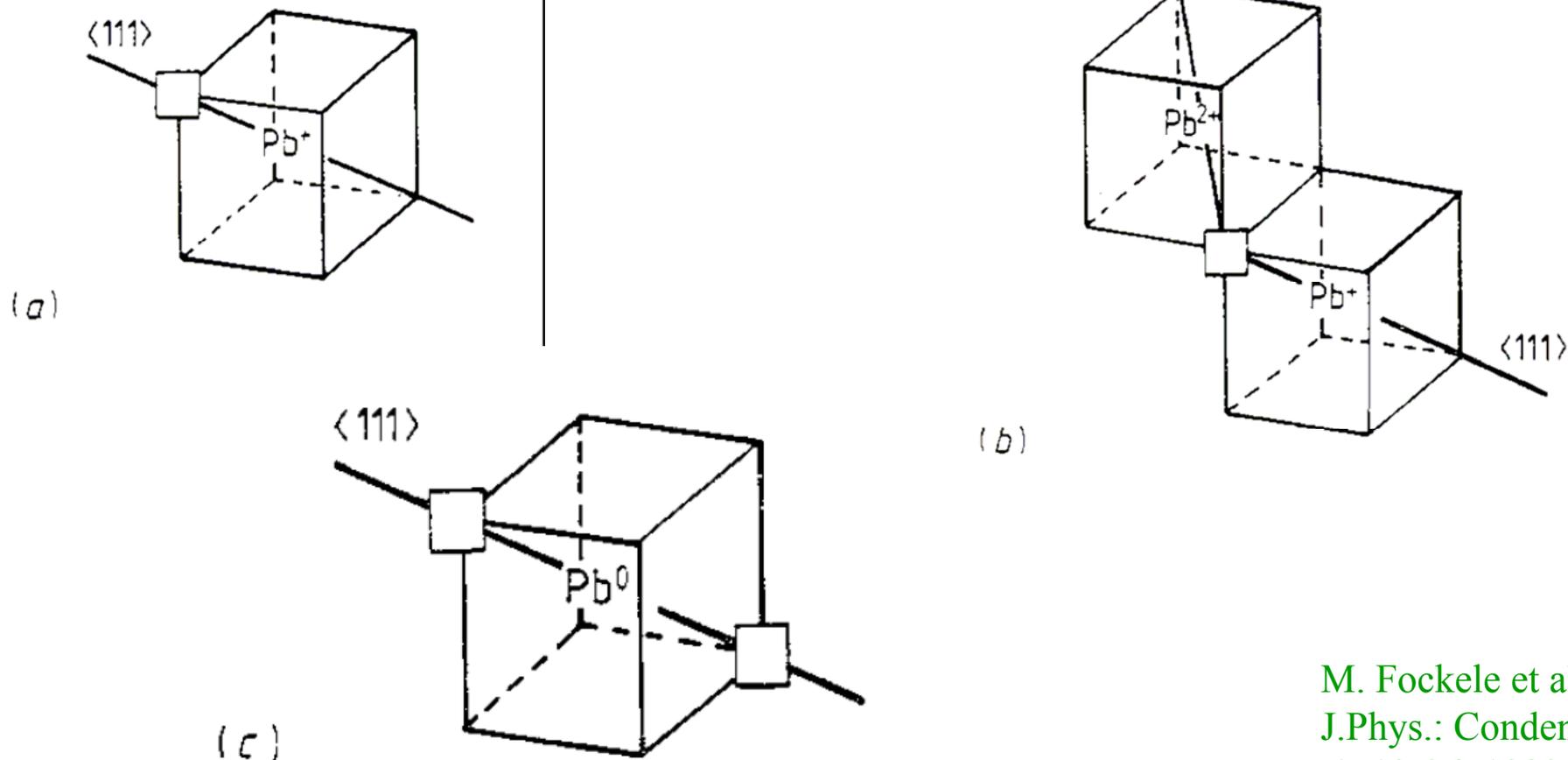


Fig. 2. Contour plots of fluorescence intensity for (a) Bi- and (b) Pb-doped ( $\text{AlF}_3$  co-doped) germanate glasses. Sn and Sb plots are similar; for details see Table 1.

*M Fockele et al*



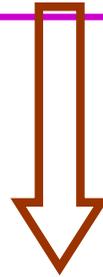
M. Fockele et al.  
J.Phys.: Condens. Matter,  
1, 13-26, 1989

**Figure 1.** Pb-centre models in alkaline-earth fluorides: (a)  $\text{Pb}^-(1)$  centre; (b)  $\text{Pb}^+(1)\text{-Pb}^{2+}$  dimer centre; (c)  $\text{Pb}^0(2)$  centre.

# Висмутовые оптические дефект-центры в стеклах

Изоэлектронные пары:  $Pb^0-Vi^+$ ,  $Pb^+-Vi^{2+}$ ,  $Pb^{2+}-Vi^{3+}$

Подобие спектров люминесценции



$Vi^{2+}$  (1):  $Vi^{2+}$  ион связанный с одиночной анионной вакансией

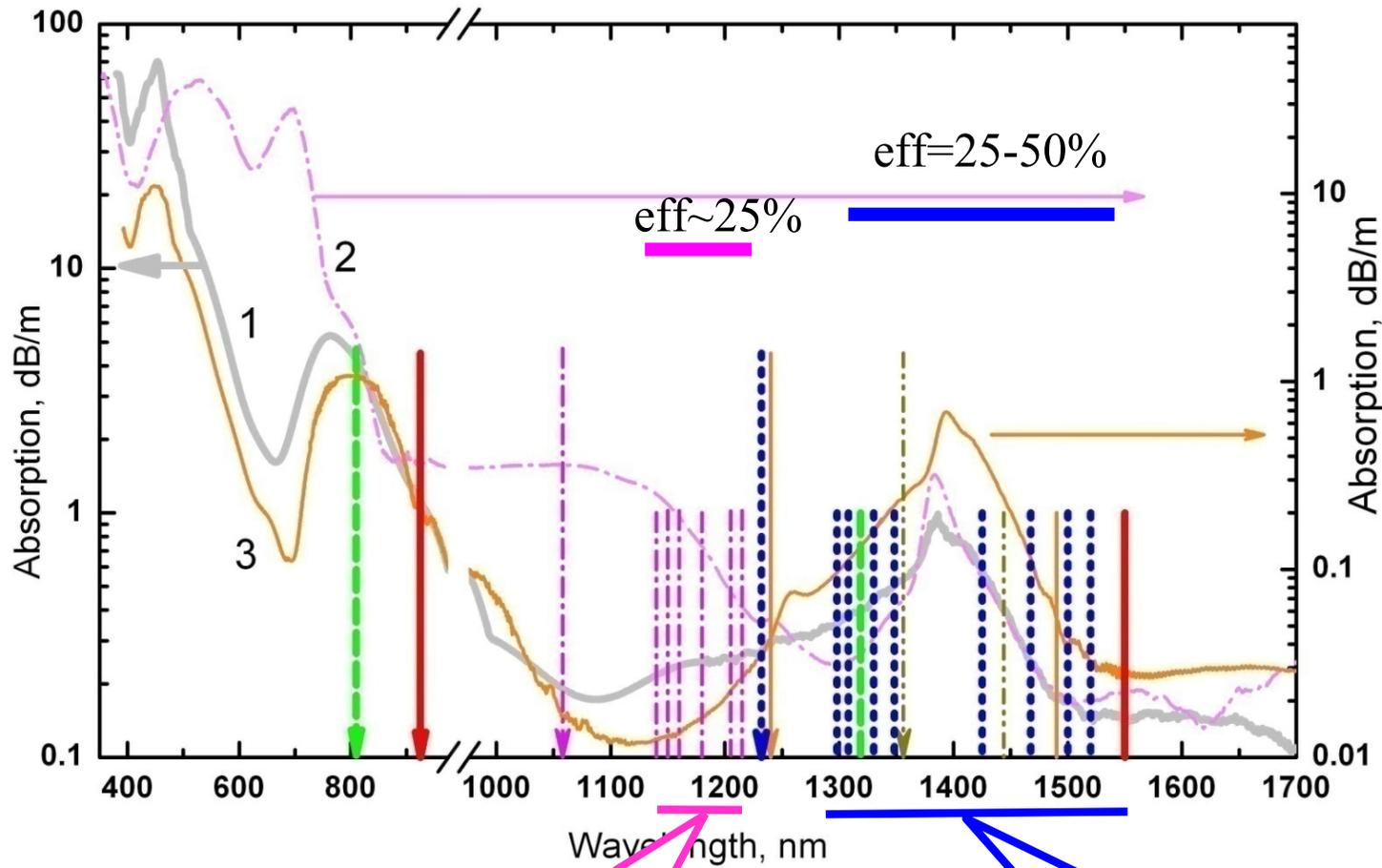
$Vi^+$  (2):  $Vi^+$  ион между двумя анионными вакансиями

$Vi$  димер: соседние  $Vi^{2+}$  и  $Vi^{3+}$  с одной вакансией между ними

E.M.Dianov, Quant. Electron., 40, 283, 2010.

# Содержание

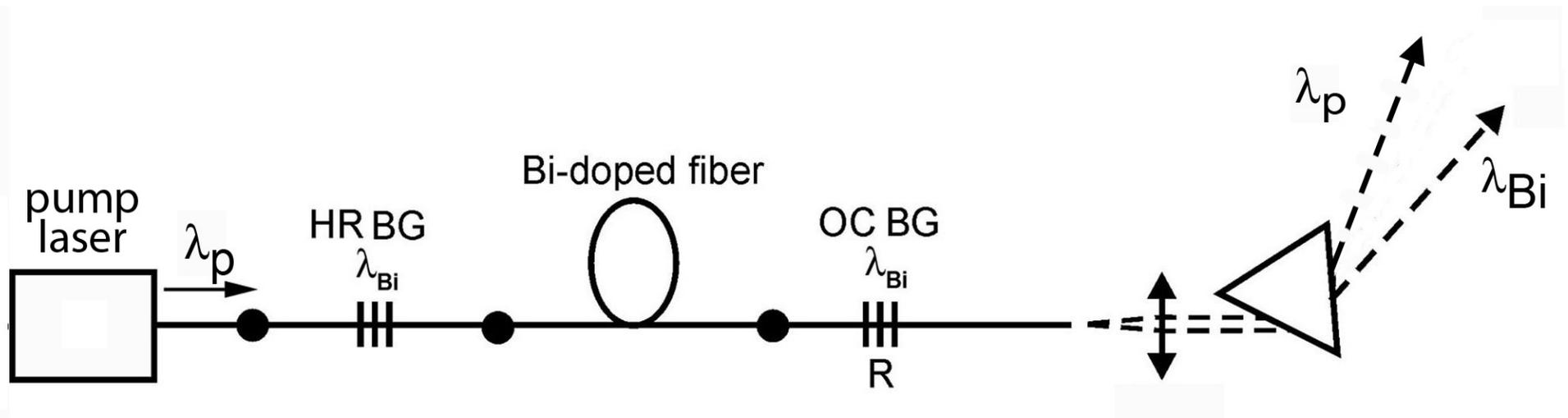
- Введение.
- Люминесцентные свойства стекол и волоконных световодов различных составов, легированных висмутом
- Какова физико-химическая природа висмутовых активных центров?
- Люминесцентные свойства перспективных висмутовых волоконных световодов
- Лучшие на сегодняшний день висмутовые волоконные лазеры и усилители.
- Заключение



Bi-doped Al-codoped  
fibers

Bi-doped P,Ge-codoped  
fibers

# Scheme of a CW Bi-doped fiber laser

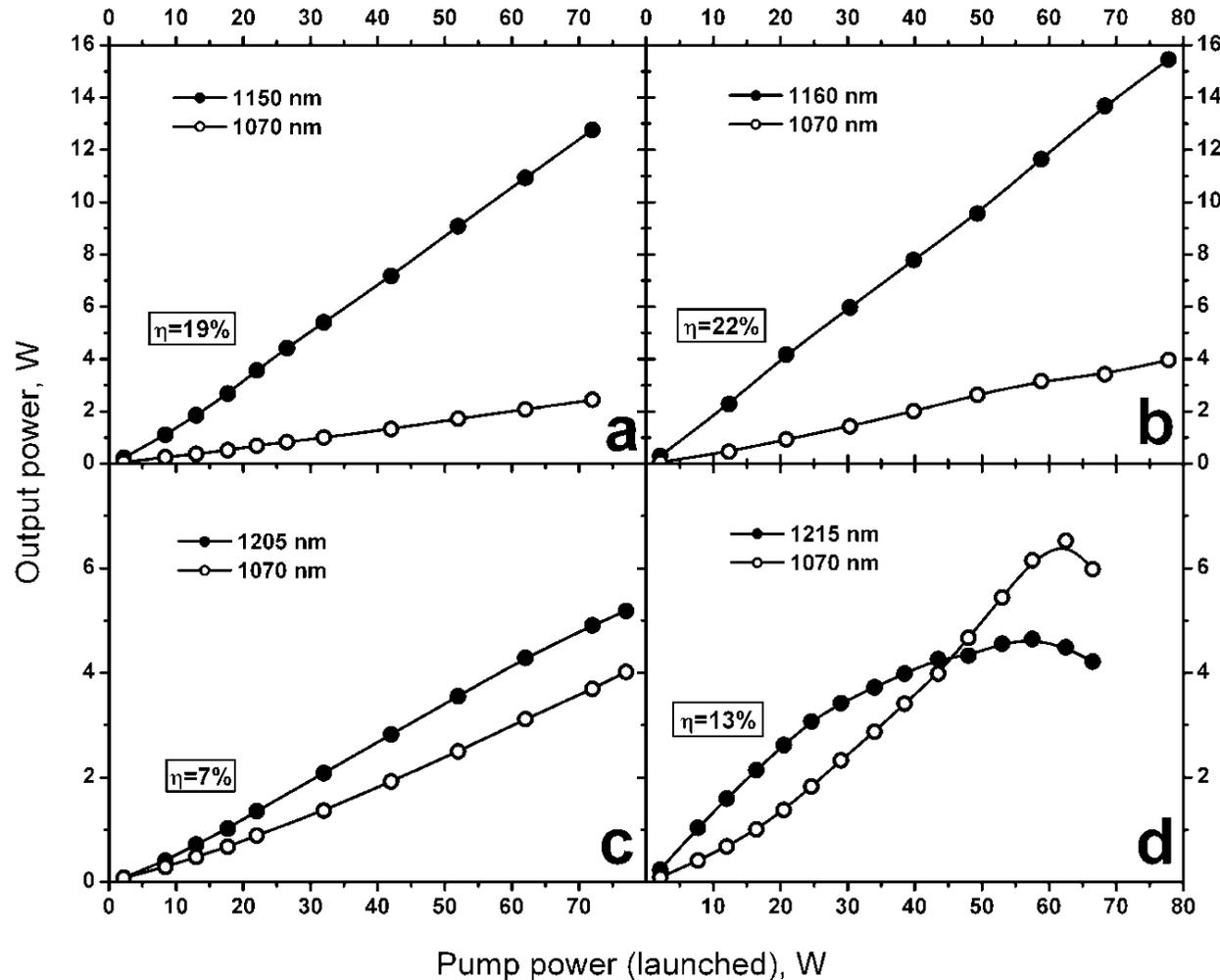


$L=50-100$  m,  $\lambda_p=1070-1318$  nm,  $\alpha \cong 0.3$ dB/m

$C_{Bi} \leq 2 \cdot 10^{-2}$  at%

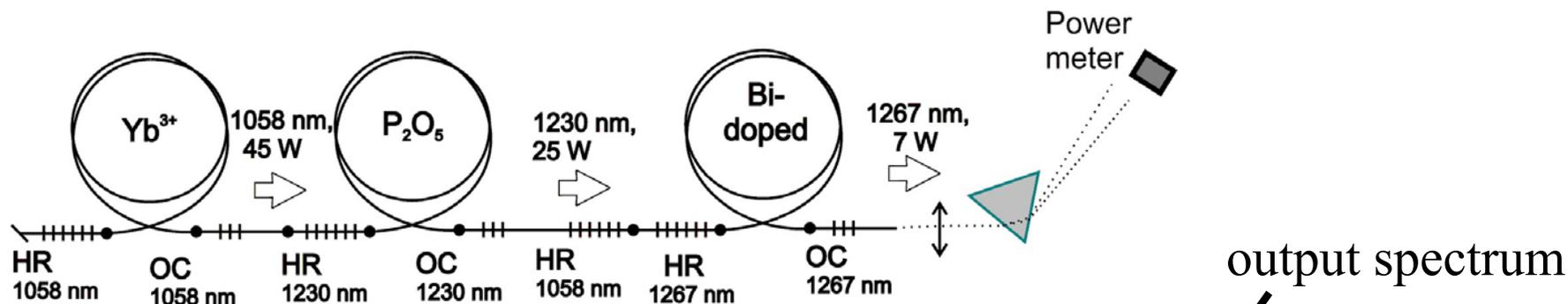
# Aluminosilicate Bi-doped fiber

Variation of the radiation power at the output of the Bi fiber laser with pump power  $\lambda_p=1070$  nm launched into a Bi-doped fiber for different lasing wavelengths (room temperature).



E.M.Dianov et al., JOSA B, 1749 (2007).

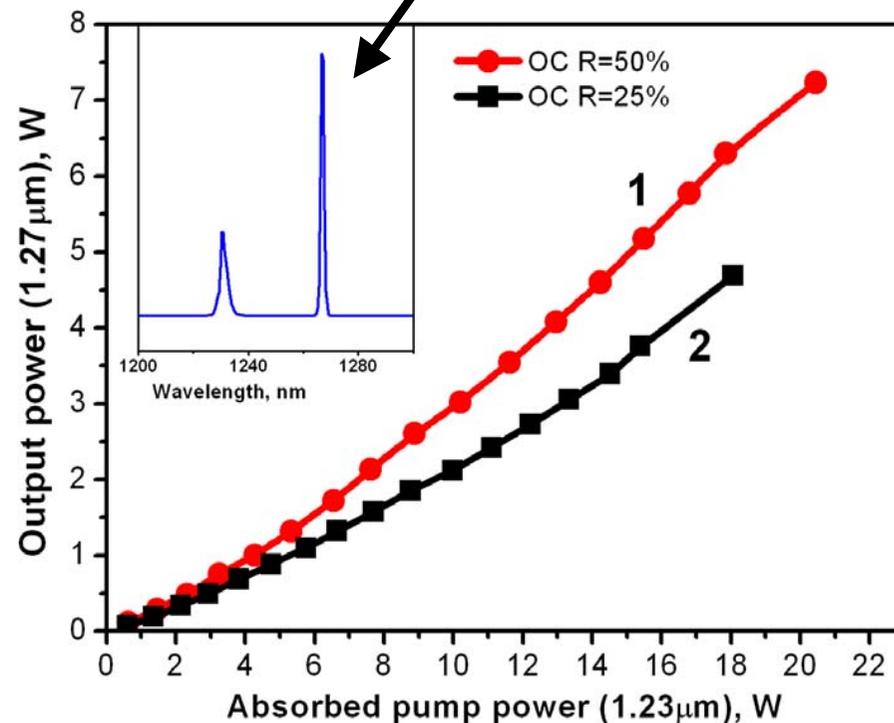
# 1270 нм висмутовый лазер



Bi-doped fiber length 95m

Laser optical-to optical  
efficiency 35%

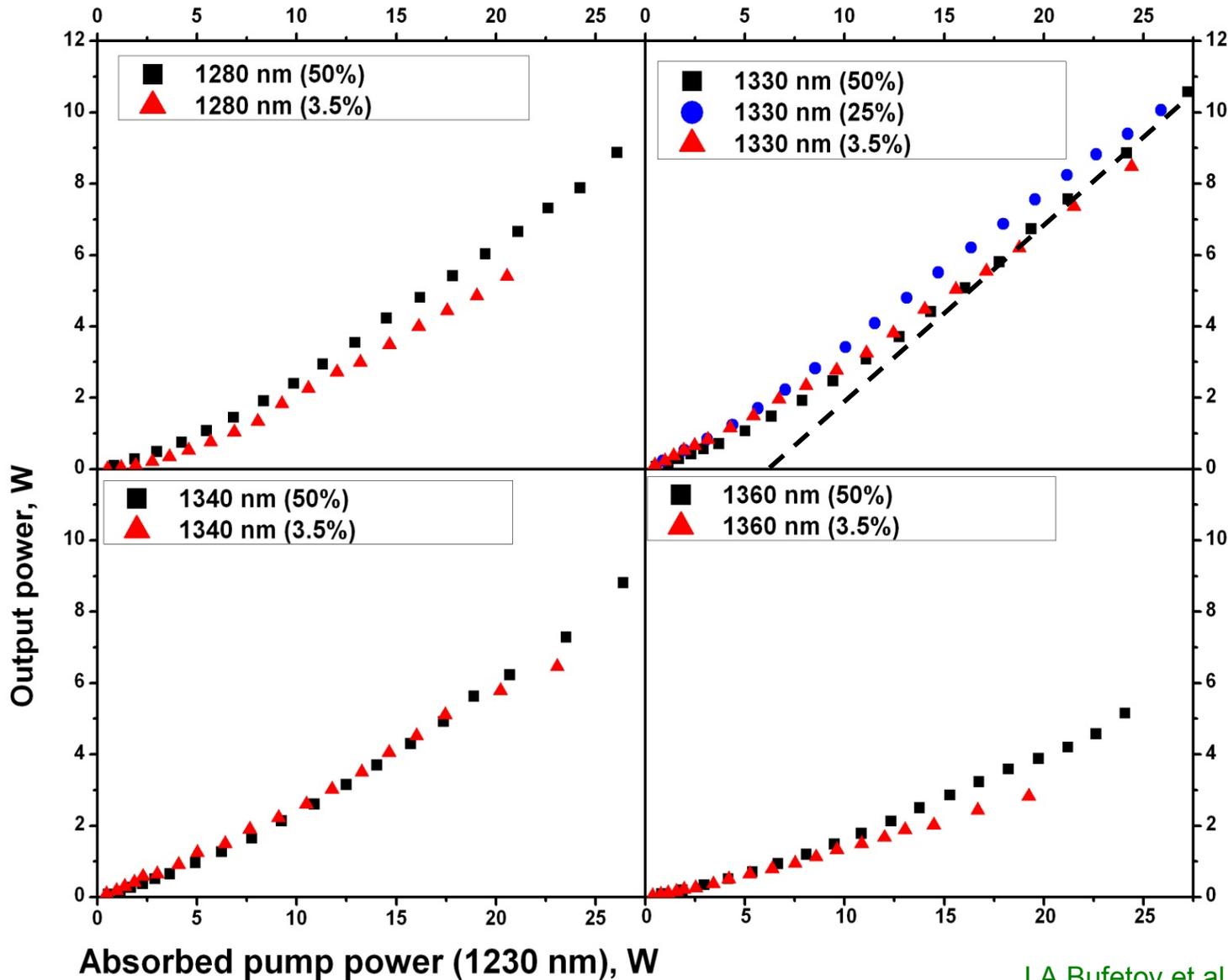
Maximal output power 7W



I.A.Bufetov et al. CLEO Europe 2011, paper CJ8.2 THU

# Germanophosphosilicate Bi-doped fiber

## Output power vs. absorbed pump power



Pump absorb. >90%

$$P_{th} \sim 100 \text{ mW}$$

$$P_{out\_max} = 10.6 \text{ W}$$

eff (max)  $\eta = 36.7\%$   
(for launched power)

eff (max)  $\eta = 38.6\%$   
(for absorbed power)

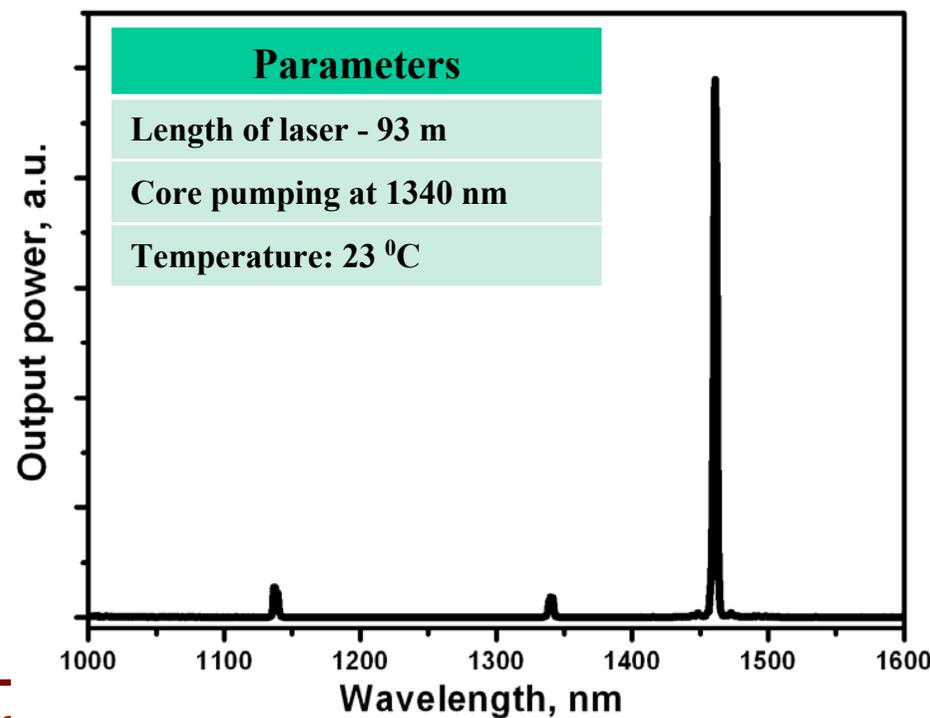
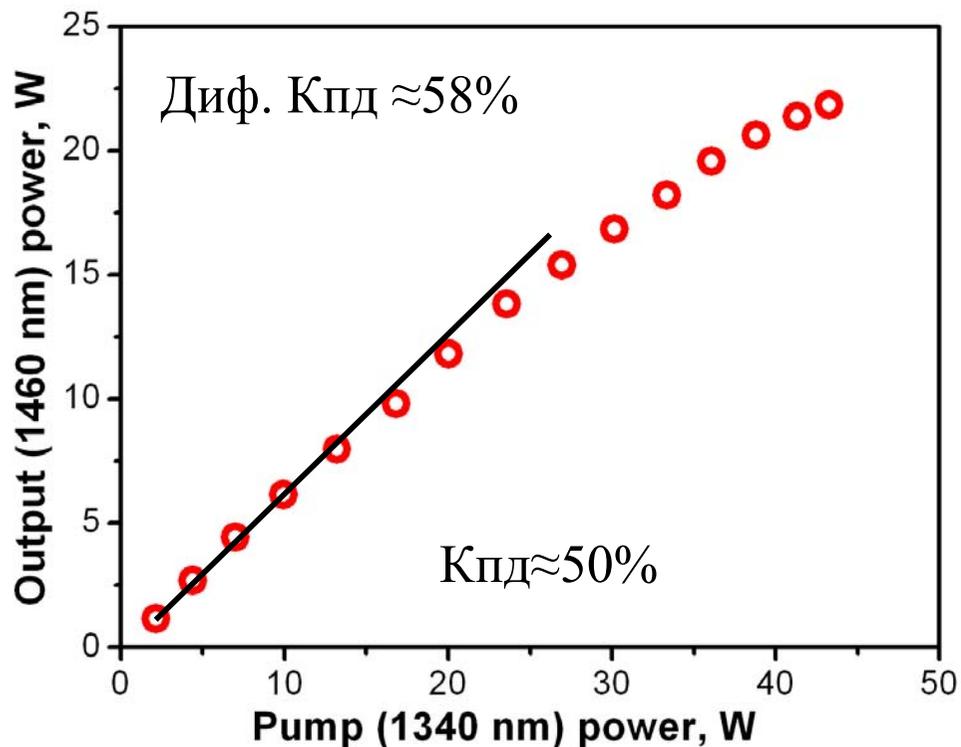
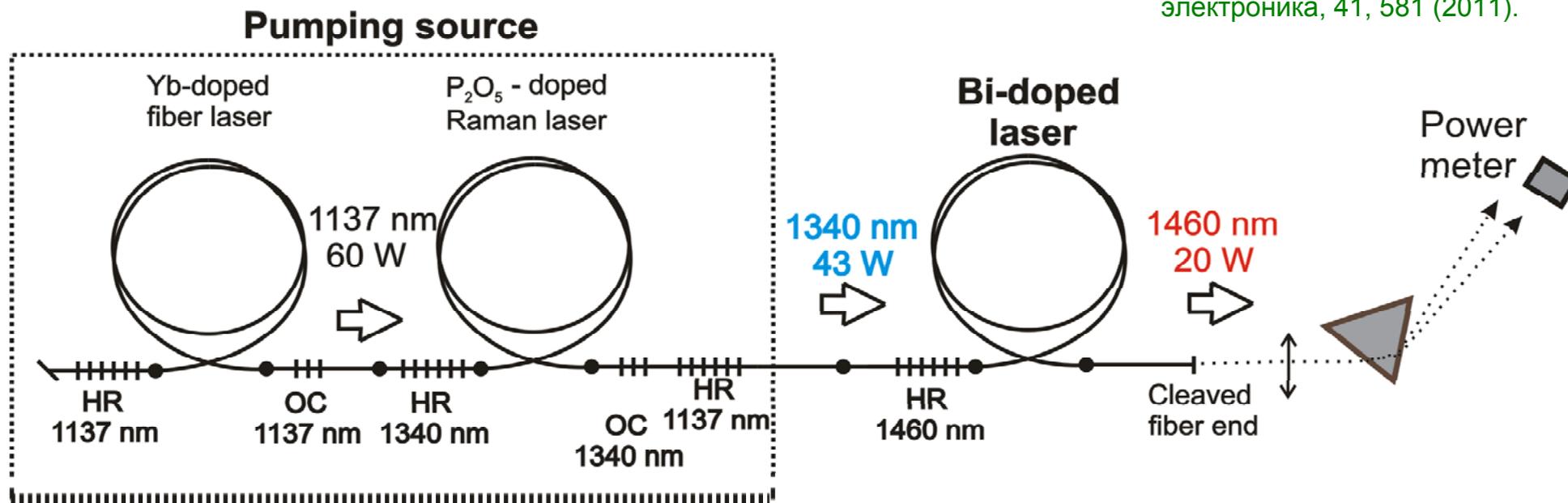
slope eff  $\eta = 50\%$   
(for absorbed power)

I.A.Bufetov et al. Proc. of SPIE , 7580, 758014 (2010)

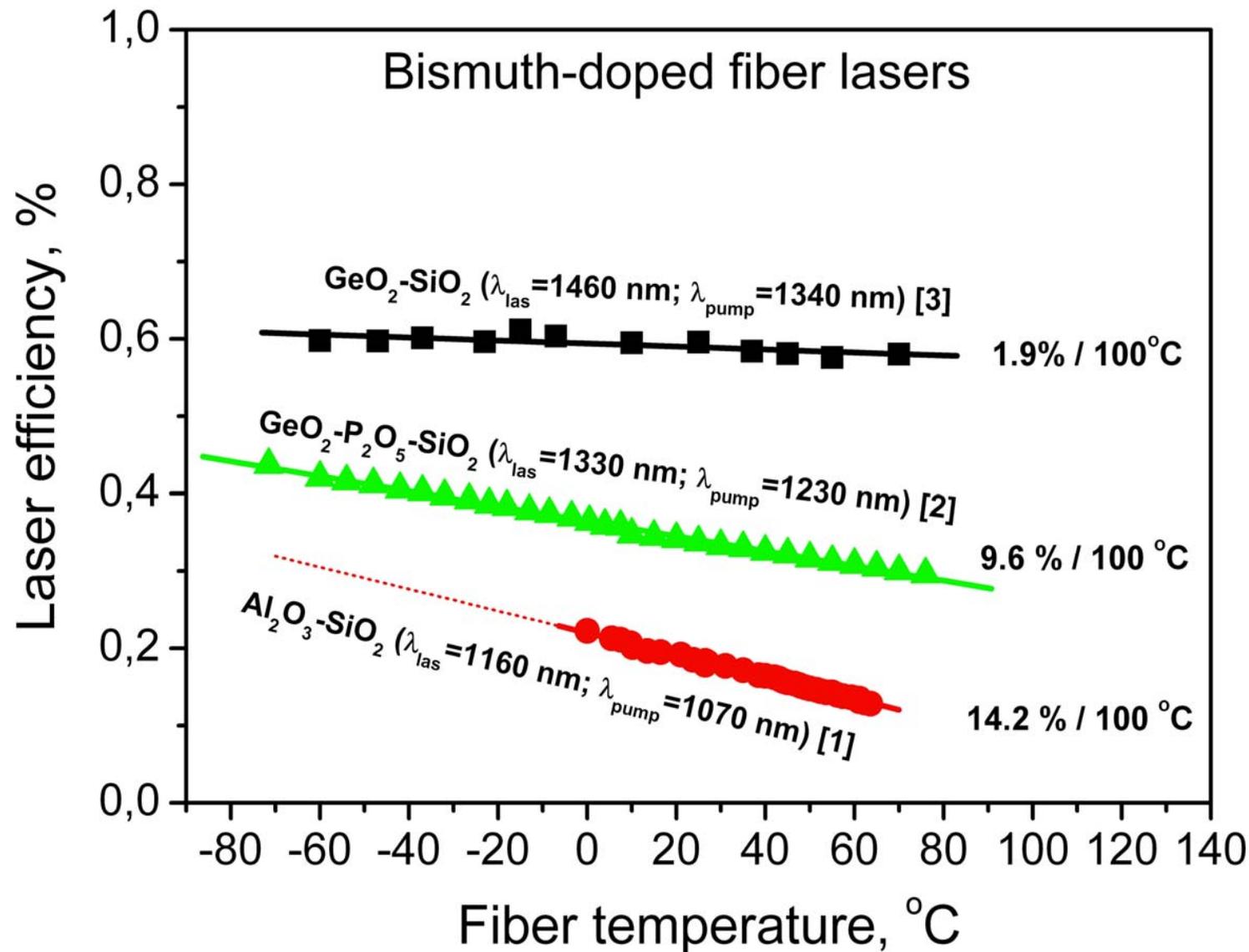
# 20 Вт висмутовый лазер на 1460 нм

S.V.Firstov et al. CLEO Europe 2011, paper PDA.7 TUE;

С.В.Фирстов и др. Квантовая электроника, 41, 581 (2011).



# Laser efficiency vs temperature

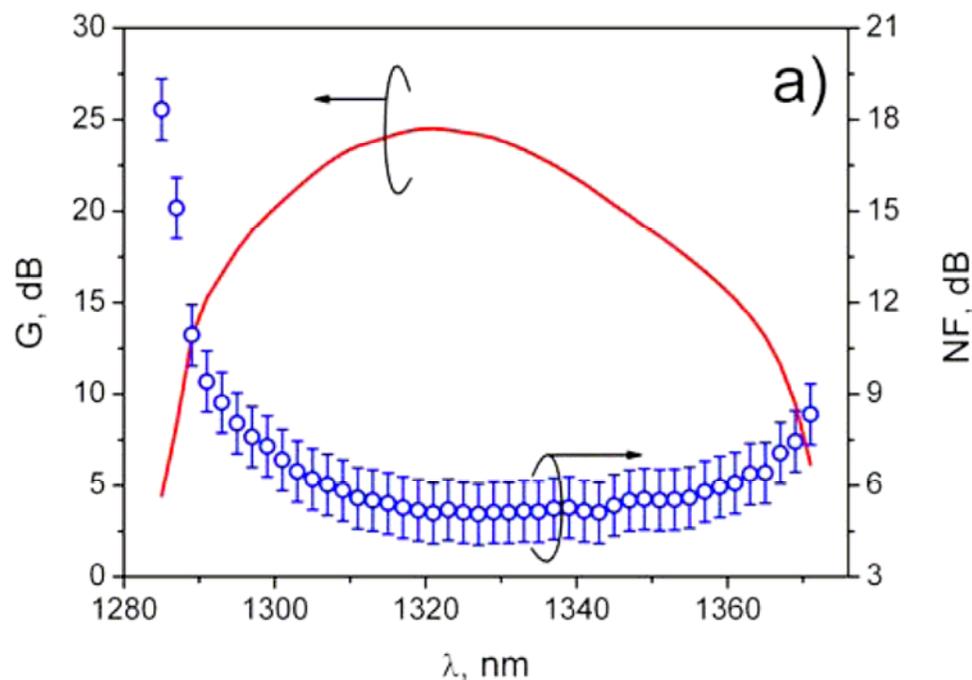


[1] E.M. Dianov et al., JOSA B, **24**, 1749 (2007)

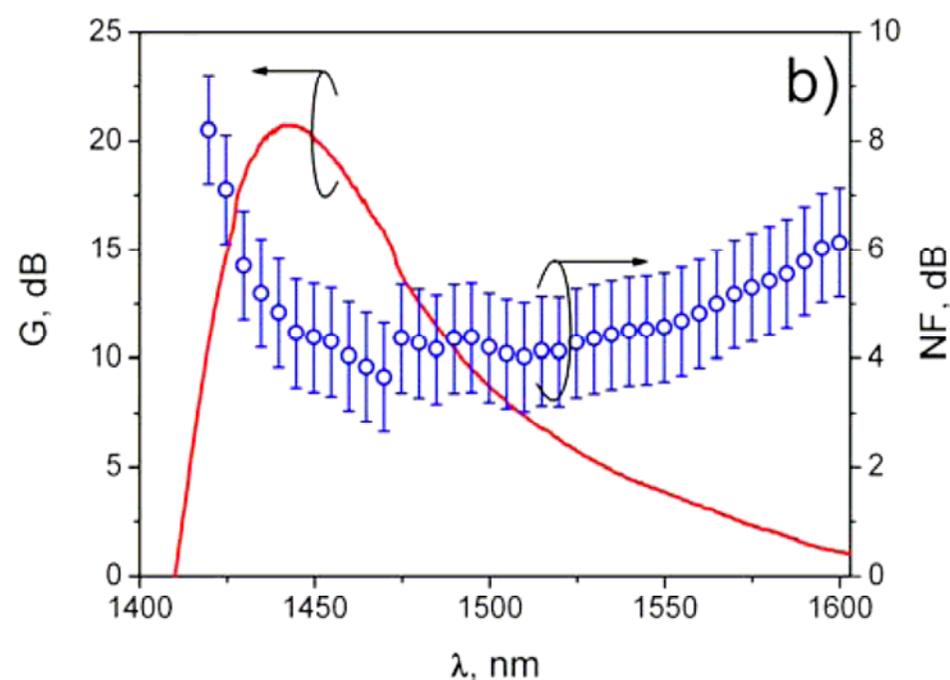
[2] I.A. Bufetov et al., Photonics West, Proceedings, **7580**, 758014 (2010)

[3] This work

# Коэфф. усиления и шум-фактор ВИСМУТОВЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ



Fiber – F1  
Pump – 460mW at 1230 nm



Fiber – F2  
Pump – 190mW at 1320 nm

Peak net gain -  $G > 20$  dB (F1, F2),  
Minimal Noise figure –  $NF(F1) \sim 5$  dB and  $NF(F2) \sim 4$  dB  
FWHM bandwidth –  $\lambda_{FWHM} = 37$  nm (F1),  $\lambda_{FWHM} = 30$  nm (F2)

E.M.Dianov et al., Quantum Electronics, **39**, 1099, (2009).

I.A.Bufetov et al., Proceedings SPIE, **7580**, 758014(2010).

M.A.Melkumov et al. Optics Letters, **36**, 2408 (2011)

# Заключение

- *За последние 6 лет достигнут значительный прогресс в изучении висмутовых активных сред и создании уникальных лазеров и усилителей на основе висмутовых волоконных световодов. Уже созданы оптические усилители в диапазоне 1420-1460 нм с параметрами, удовлетворяющими условиям их применения в системах волоконной связи. Максимальная мощность непрерывных висмутовых лазеров достигла 20 Вт при КПД до 50%.*
- *В настоящее время еще не создано адекватной экспериментальным результатам модели висмутовых активных центров.*

Спасибо за внимание