

**Синтез в СВЧ плазме поликристаллических и
монокристаллических алмазных пленок и наночастиц,
обладающих интенсивной примесной
фотолюминесценцией: Si, Ge, Eu**
Седов Вадим Станиславович

Алмаз является прозрачным материалом в широком диапазоне длин волн (от УФ до микроволнового излучения). Введение в решетку примесей позволяет сформировать в алмазе центры окраски, активные в видимой и ближней ИК областях спектра. В данной работе были исследованы алмазные пленки и частицы, обладающие интенсивной фотолюминесценцией (ФЛ) за счет внедрения в алмаз примесей кремния, германия, а также наночастиц фторидов европия на этапе синтеза алмаза в СВЧ плазме.

Для создания центров окраски **кремний-вакансия** в пленках и изолированных кристаллитах алмаза реализовано легирование кремнием в процессе их роста, используя кристаллический кремний в контакте с атомарным водородом плазмы в качестве поставщика Si в плазму. Получены профили по глубине введенного таким образом в алмазные пленки атомов Si, выделен вклад «самолегирования» (достигающий $\sim 10^{20}$ ат/см³) от кремниевой подложки, измерены спектры фотолюминесценции центров окраски Si-вакансия, излучающих на длине волны 738 нм.

Осуществлено легирование поликристаллического и монокристаллического алмаза кремнием с использованием газа силана (SiH₄) в качестве источника примеси. Подобраны оптимальные режимы легирования, позволяющие достигнуть наиболее интенсивной ФЛ центров Si-V. Установлено, что микрокристаллические алмазные пленки обладают на порядок более интенсивной люминесценцией Si-V центров, чем нанокристаллические алмазные пленки той же толщины. С использованием метода вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) установлена взаимосвязь между концентрацией силана в процессе роста и концентрацией кремния в

синтезированных монокристаллических алмазных слоях. Впервые определен коэффициент вхождения кремния в алмаз из газовой фазы:
 $f = [\text{Si}/\text{C}]_{\text{алмаз}}/[\text{Si}/\text{C}]_{\text{газ}} = (1.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$.

Установлено, что слои полимеров ПГК или ПНГК могут быть использованы в качестве прекурсора (источника зародышей) алмаза при синтезе микро и нанокристаллических алмазных пленок в СВЧ плазме. С использованием полимера ПНГК-Si, содержащего одиночные гетероатомы кремния, осуществлен синтез легированного кремнием поликристаллического алмаза без использования внешних источников примеси.

Установлено, что в сильно легированных кремнием алмазных пленках проявляется новый, ранее не зарегистрированный пик люминесценции на длине волны 723 нм.

Исследован новый оптически активный дефект **германий-вакансия** (Ge-V), который по строению близок к центру окраски Si-V в алмазе. В легированных германием тонких поликристаллических алмазных пленках, выращенных в СВЧ плазме на подложках Ge, обнаружена сильная фотолюминесценция в оранжевой области спектра с бесфононной линией (БФЛ) на длине волны 602 нм. Ширина БФЛ составляет 4-5 нм при комнатной температуре и 1,2 нм при T=5 К.

Методом плазмохимического осаждения на подложках микрокристаллического и монокристаллического алмаза с нанесенными из водной суспензии наночастицами редкоземельных элементов были получены композитные пленки «**алмаз - наночастицы РЗЭ**». Подтверждено, что частицы, встроенные в алмаз, имеют тот же элементный состав, что и исходный порошок. Полученный материал обладает локальной люминесценцией на длине волны 611.6 нм, что соответствует переходу ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ в атоме Eu.

Также были синтезированы ап-конверсионные алмазные плёнки с использованием наночастиц из редкоземельных элементов $\text{La}_{0.895}\text{Yb}_{0.0875}\text{Er}_{0.0175}\text{F}_3$, способные излучать свет в видимом диапазоне под действием ИК-излучения.

Полученные результаты были использованы для создания суспензий алмазных наночастиц размером 10-100 нм с контролируемой ФЛ Si-V центров на длине волны 738 нм. Подобные наночастицы могут быть использованы как в качестве люминесцентных биомаркеров (сильное легирование), так и в качестве источников одиночных фотонов для задач квантовой оптики (слабое легирование).

_____ / Седов В.С./

- (1) Shershulin, V. A.; Samoylenko, S. R.; Sedov, V. S.; Kudryavtsev, O. S.; Ralchenko, V. G.; Nozhkina, A. V.; Vlasov, I. I.; Konov, V. I. *Laser Phys. Lett.* **2017**, *14* (2), 026003.
- (2) Sedov, V. S.; Kuznetsov, S. V.; Ralchenko, V. G.; Mayakova, M. N.; Krivobok, V. S.; Savin, S. S.; Zhuravlev, K. P.; Martyanov, A. K.; Romanishkin, I. D.; Khomich, A. A.; Fedorov, P. P.; Konov, V. I. *Diamond and Related Materials* **2017**, *72*, 47–52.
- (3) Sedov, V. S.; Krivobok, V. S.; Khomich, A. V.; Ralchenko, V. G.; Khomich, A. A.; Martyanov, A. K.; Nikolaev, S. N.; Poklonskaya, O. N.; Konov, V. I. *J. Appl. Spectrosc.* **2016**, *83* (2), 229–233.
- (4) Ralchenko, V.; Sedov, V.; Saraykin, V.; Bolshakov, A.; Zavedeev, E.; Ashkinazi, E.; Khomich, A. *Appl. Phys. A* **2016**, *122* (9), 795.
- (5) Shershulin, V. A.; Sedov, V. S.; Ermakova, A.; Jantzen, U.; Rogers, L.; Huhlina, A. A.; Teverovskaya, E. G.; Ralchenko, V. G.; Jelezko, F.; Vlasov, I. I. *Phys. Status Solidi A* **2015**, *212* (11), 2600–2605.
- (6) Sedov, V. S.; Ralchenko, V. G.; Vlasov, I. I.; Kalinichenko, Y. I.; Khomich, A. A.; Savin, S. S.; Konov, V. I. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **2015**, *41* (12), 359–363.
- (7) Sedov, V. S.; Khomich, A. A.; Ralchenko, V. G.; Martyanov, A. K.; Savin, S. S.; Poklonskaya, O. N.; Trofimov, N. S. *Journal of Coating Science and Technology* **2015**, *2* (2), 38–45.
- (8) Sedov, V.; Ralchenko, V.; Khomich, A. A.; Vlasov, I.; Vul, A.; Savin, S.; Goryachev, A.; Konov, V. *Diamond and Related Materials* **2015**, *56*, 23–28.
- (9) Ralchenko, V. G.; Sedov, V. S.; Khomich, A. A.; Krivobok, V. S.; Nikolaev, S. N.; Savin, S. S.; Vlasov, I. I.; Konov, V. I. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **2015**, *42* (6), 165–168.
- (10) Podgursky, V.; Bogatov, A.; Sedov, V.; Sildos, I.; Mere, A.; Viljus, M.; Buijnsters, J. G.; Ralchenko, V. *Diamond and Related Materials* **2015**, *58*, 172–179.
- (11) Bolshakov, A.; Ralchenko, V.; Sedov, V.; Khomich, A.; Vlasov, I.; Khomich, A.; Trofimov, N.; Krivobok, V.; Nikolaev, S.; Khmelnitskii, R.; others. *physica status solidi (a)* **2015**, *212* (11), 2525–2532.
- (12) Sedov, V. S.; Ralchenko, V. G.; Khomich, A. A.; Sizov, A. I.; Zvukova, T. M.; Konov, V. I. *J. Superhard Mater.* **2012**, *34* (1), 37–43.
- (13) Sedov, V. S.; Vlasov, I. I.; Ralchenko, V. G.; Khomich, A. A.; Konov, V. I.; Fabbri, A. G.; Conte, G. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **2011**, *38* (10), 291–296.