

УДК 539.234

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ С ИОННЫМ АССИСТИРОВАНИЕМ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ НАНОПЛАЗМОНИКИ**Айдар Радикович Габидуллин<sup>(1)</sup>, Александр Сергеевич Бабурин<sup>(2)</sup>, Илья Анатольевич Рыжиков<sup>(3)</sup>*Магистр 1 года<sup>(1)</sup>, аспирант 1 года<sup>(2)</sup>**кафедра «Электронные технологии в машиностроении»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Кандидат технических наук, заведующий лабораторией ИТПЭ РАН<sup>(3)</sup>**Научный руководитель: К.М. Моисеев,**кандидат технических наук, доцент кафедры "Электронные технологии в машиностроении"***Введение**

В конце 20 – начале 21 века возник огромный интерес к оптике металлических наночастиц [1] и вместе с ним появилась новая область оптики – наноплазмоника. Изучение этого направления учеными со всего мира уже дает перспективные результаты, которые удастся использовать для решения задач, например, в отраслях медицины, микробиологии (сенсоры сверхвысокой чувствительности) [2, 3], электротехнической промышленности (интегрированные оптоэлектронные приборы) и других [4-6]. Наноплазмоника включает в себя преимущества электронных и фотонных устройств, т.е. малые размеры электронных компонентов и высокие рабочие частоты фотонных устройств (рисунок 1).

Объектом изучения наноплазмоники являются оптические свойства металлических наноструктур, которые определяются колебаниями электронов проводимости. Колебания свободного электронного облака относительно кристаллической решетки еще называются плазмонными колебаниями (или поставленные им в соответствие с точки зрения квантовой механики квазичастицы – плазмоны). Наиболее интересными, с точки зрения использования в наноустройствах, являются колебания на поверхности раздела металла и диэлектрика. Основной идеей использования плазмонных колебаний во многих приложениях является их локализация вблизи разделяющей поверхности.

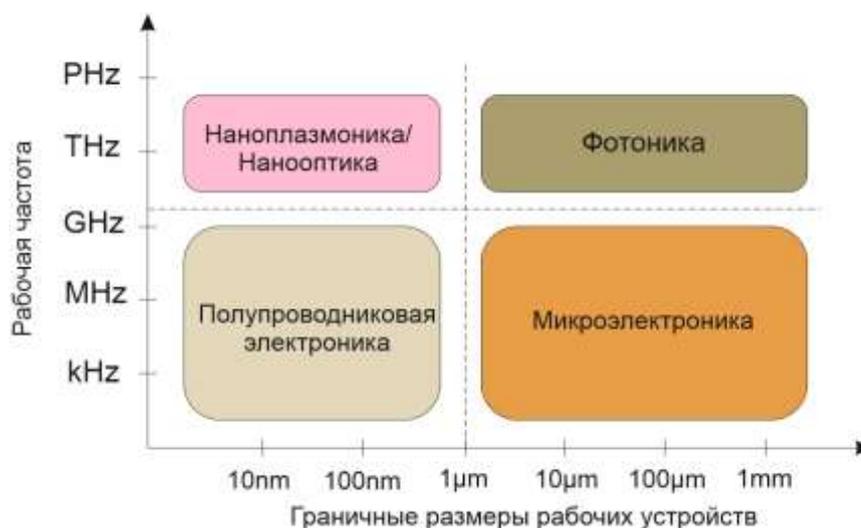


Рис. 1. Диаграмма соответствия направлений [7]

К одним из возможных применений относится использование плазмонного резонанса для оптической спектроскопии [8]. На рисунке 2 представлена схема проведения анализа с помощью сенсорного чипа. Для возбуждения плазмонных колебаний на гладкой границе металл-диэлектрик используется метод, называемый по фамилии автора “геометрией Кречмана”. Исследуемый образец равномерно подается на рабочую поверхность сенсора, где происходит их взаимодействие. Любое изменение взаимодействия на поверхности фиксируется сенсором. По данным сенсора прибор в режиме реального времени строит кривую взаимодействия исследуемого образца с сенсорным чипом.

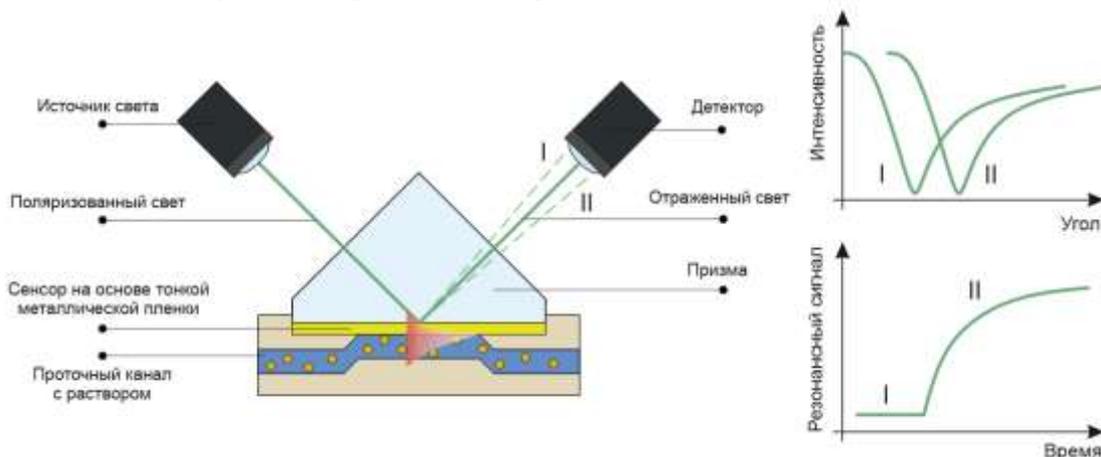


Рис. 2. Сенсор на основе эффекта плазмонного резонанса

Слой металлической пленки сенсора (например, серебра или золота) должен иметь определенную толщину, шероховатость и структуру, поскольку в противном случае энергия падающего света будет переизлучаться в обратном направлении (зеркальная поверхность). Если толщина пленки достаточно мала, часть электромагнитной волны достигнет её внешней поверхности и если энергия электрического поля фотонов будет достаточно велика, то они будут взаимодействовать с электронами на поверхности металлической пленки.

Также, новая область дает возможность создания наноразмерных когерентных оптических источников излучения [9-12]. В статье [13] продемонстрирован прототип подобного устройства, которому дано название “спазер” (“spaser”). На рисунке 3, а схематично изображена конфигурация спазера. Структура включает в себя стеклянную подложку и серебряную пленку, на которой сформирован периодический массив отверстий. Для исключения границы раздела металл-воздух и оптического усиления выходного излучения нанесен тонкий слой поливинилового спирта. Возбуждение плазмонных колебаний в структуре проводилось лазером с длиной волны 527 нм. В результате, такая структура позволила авторам наблюдать плазмонный резонанс в видимом и ближнем ИК-диапазоне, чем они продемонстрировали возможность реализации направленного излучения с помощью плазмонной структуры.

Современные плазмонные устройства на телекоммуникационных и оптических частотах сталкиваются с серьезными проблемами из-за потерь, среди которых значительную часть составляют потери, возникающие за счет рассеяния в кристаллической решетке или на границах зерен тонких пленок металлов [9]. Поэтому, для использования технологических возможностей таких пленок их необходимо получать со структурой, близкой к идеальной монокристаллической. Наиболее широко используемым процессом получения монокристаллических пленок является эпитаксия, в том числе и монокристаллический рост материала на другом материале – гетероэпитаксия [10].

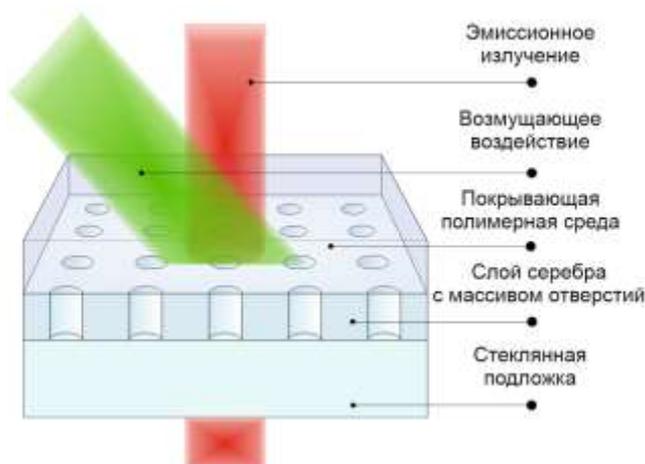


Рис. 3. Конфигурация устройства спазер [6]

### Анализ методов получения эпитаксиальных пленок

Одним из основных методов получения эпитаксиальных пленок является метод молекулярно-лучевой эпитаксии (далее МЛЭ) [16]. Его суть заключается в испарении и осаждении материала с искусственно ограниченным потоком на нагретую подложку в среде сверхвысокого вакуума. К преимуществам этого метода относят использование ряда прецизионных методов контроля роста пленки и высокую чистоту широкого спектра осаждаемых материалов за счет среды сверхвысокого вакуума. Однако такие возможности делают оборудование, реализующее вышеперечисленные преимущества, узкоспециализированным и относительно дорогим.

Также, применяется метод импульсно-лазерного нанесения (ИЛН) с помощью которого исследовательские группы со всего мира получают эпитаксиальные пленки различных материалов, в том числе и металлических [17]. К основным преимуществам метода относится, прежде всего, высокая степень соответствия стехиометрии осажденных пленок составу материала мишени, а также использование только низкоэнергетической части плазмы, что способствует получению бездефектных пленок. Недостатком данного метода является малый геометрический размер зоны осаждения и сложность применяемого оборудования.

Альтернативным методом может выступать метод электронно-лучевого испарения [18]. Сущность этого метода состоит в том, что кинетическая энергия сфокусированного электронного луча превращается в тепловую, таким образом, локально расплавляя материал. Такой подход к процессу испарения позволяет варьировать скорости осаждения от единиц ангстрем до сотен нанометров в секунду, что даёт возможность управлять структурой пленки в широком диапазоне. При этом процессы формирования пленок проводятся в среде высокого вакуума, что обеспечивает высокую чистоту полученного покрытия.

В таблице 1 собраны преимущества и недостатки перечисленных методов формирования эпитаксиальных пленок.

Таблица 1. Сравнение методов получения эпитаксиальных пленок

Метод	Преимущества	Недостатки
Молекулярно-лучевая эпитаксия	-Проведение процессов в среде сверхвысокого вакуума -Прецизионные методы контроля во время процесса -Безынерционное управление потоками материала	-Использование узкоспециализированного оборудования -Высокая стоимость реализации
Импульсно-лазерное нанесение	-Высокая степень соответствия стехиометрии пленок составу материала мишени	-Малый геометрический размер зоны осаждения -Сложность применяемого оборудования

	-Повышенное качество получаемых покрытий -Проведение процессов в среде сверхвысокого вакуума	
Электронно-лучевое испарение	-Метод позволяет проводить процессы в широком диапазоне скоростей осаждения -Возможно проведение ионного ассистирования в процессе нанесения	-Плохая адгезия получаемых покрытий

Метод МЛЭ предназначен преимущественно для выращивания кристаллических структур, что делает его не универсальным. Благодаря импульсному дозированию распыляемого материала, ИЛН применяется при необходимости получения сложных по стехиометрическому составу структур. Электронно-лучевое испарение же позволяет проводить процессы в широком диапазоне скоростей и применять методы ионной обработки подложки, в частности и во время процесса осаждения, это дает дополнительные возможности для управления структурой получаемого покрытия.

#### **Электронно-лучевое испарение с ионным ассистированием**

В процессе формирования эпитаксиальных пленок все составляющие процессов зарождения и роста имеют сильную энергетическую зависимость. Это говорит о том, что, управляя энергетическим воздействием на атомы осаждаемого материала, можно влиять на процесс кристаллизации. Нагрев подложкодержателя является наиболее распространенным способом сообщения дополнительной энергии, однако использование высоких температур не всегда является допустимым. С восьмидесятых годов проводятся исследования и разработки в области нетермической активации кристаллизационных процессов. Наиболее эффективным является облучение поверхности роста тяжелыми заряженными частицами – ионами [19].

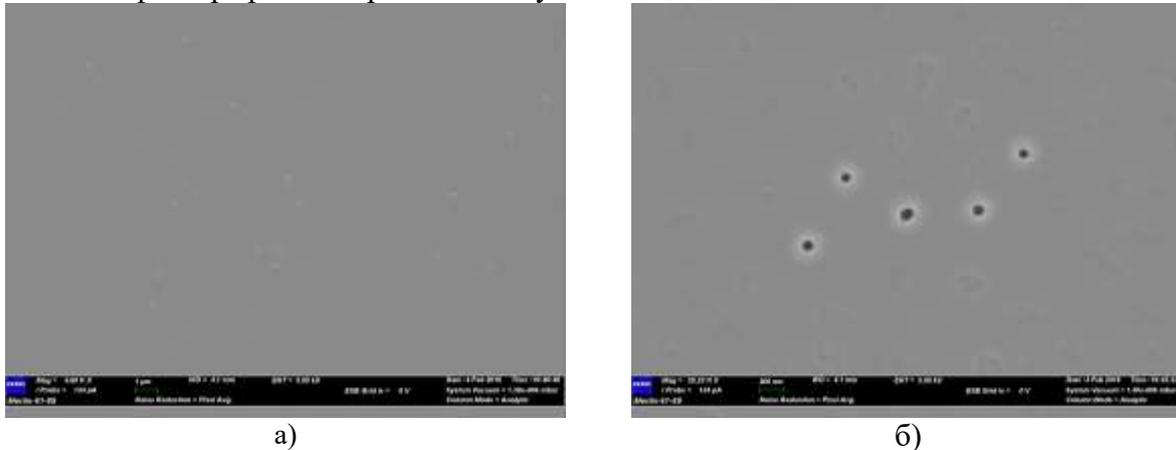
Электронно-лучевое испарение с ионным ассистированием (ЭЛИИА) применяется для управления параметрами тонкопленочных покрытий, среди которых размер зерна, шероховатость поверхности, плотность и оптические характеристики пленки в широком диапазоне значений. В частности, ЭЛИИА может быть использовано для процессов выращивания эпитаксиальных тонких пленок [20]. Использование ионной бомбардировки поверхности в процессах кристаллизации позволяет увеличивать энергию конденсирующихся атомов без применения высоких температур, что позволяет работать с подложками и промежуточными слоями из нетермостойких материалов. А также, снижение температуры нагрева подложкодержателя позволяет уменьшить газовыделение в вакуумной системе.

#### **Проведение экспериментов**

В научно-образовательном центре “Функциональные микро/наносистемы” ведутся работы по подбору режима формирования эпитаксиальных пленок серебра для функциональных слоёв изделий наноплазмоники. Отработка режима проводится на установке электронно-лучевого испарения EVOVAC производства компании Angstrom Engineering, Канада, которая оборудована бессеточным источником ионов с широким диапазоном рабочих энергий. На данном этапе исследований изучается эпитаксиальный рост пленки без ионного ассистирования на слюдяной подложке, которая характеризуется наличием больших по площади атомарных участков и относительно низкой температурой эпитаксиального роста. Корректировка режима проводилась варьированием температуры подложки и скорости осаждения. Получены сплошные пленки с кристаллитами более микрона и дефектами в виде проколов с характерным размером около 50 нм. Размер кристаллита превышает длину волны

возбуждающего излучения и, соответственно, плазмона. Это позволяет значительно снизить рассеяние на границах.

Устранение дефектов возможно благодаря продолжению двумерного роста кристаллита, которое может быть простимулировано ионным ассистированием. На рисунке 4 представлены фотографии поверхности полученной пленки.



а) — увеличение в 4600 раз, б) — увеличение в 25000 раз

Рис. 4. Изображения поверхности пленок, полученные в сканирующем электронном микроскопе

### Заключение

В результате выполненной работы проанализированы требования функциональных слоёв изделий наноплазмоники и проведено сравнение методов, обеспечивающих соблюдение этих требований. Также показаны преимущества применения электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием.

В дальнейшем запланированы эксперименты по получению эпитаксиальных пленок серебра электронно-лучевым испарением с ионным ассистированием, которое позволит увеличить размер кристаллита и устранить дефекты за счет преимущественно двумерного роста.

### Литература

1. Климов В.В., Наноплазмоника (М.: Физматлит, 2010);
2. Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species //Chemical reviews. – 2008. – Т. 108. – №. 2. – С. 462-493.
3. Halvorson R. A., Vikesland P. J. Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) for environmental analyses //Environmental science & technology. – 2010. – Т. 44. – №. 20. – С. 7749-7755.
4. Masanovic G. et al. A high efficiency input/output coupler for small silicon photonic devices //Optics express. – 2005. – Т. 13. – №. 19. – С. 7374-7379.
5. Jetté-Charbonneau S. et al. Demonstration of Bragg gratings based on long ranging surface plasmon polariton waveguides //Optics express. – 2005. – Т. 13. – №. 12. – С. 4674-4682.
6. Takahara J. et al. Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter //Optics letters. – 1997. – Т. 22. – №. 7. – С. 475-477.
7. M. Brongersma, V. Shalaev, Nanophotonics with Metamaterials, science 2010;
8. Biosensing Instruments inc, Technical Note №101: Principle of SPR detection: intensity profile and shift of the SPR angle;
9. Luyu Wang, Franklin Che, Sergey A. Ponomarenko, Zhizhang (David) Chen, Plasmon-enhanced spectral changes in surface sum-frequency generation with polychromatic light;
10. David J. Bergman and Mark I. Stockman, “Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Quantum Generation of Coherent Surface Plasmons in Nanosystems”, 2003;

11. *M. A. Noginov, G. Zhu, A. M. Belgrave, R. Bakker, V. M. Shalaeв, E. E. Narimanov*, “Demonstration of SPASER-based Nanolaser”, 2009;
12. *Victor Coello and Cesar E. Garcia-Ortiz*, Classical Plasmonics, “Wave Propagation Control at Subwavelength Scale”, 2015;
13. *Meng X. et al.* Highly directional spaser array for the red wavelength region //Laser & Photonics Reviews. – 2014. – Т. 8. – №. 6. – С. 896-903.
14. *West P. R. et al.* Searching for better plasmonic materials //Laser & Photonics Reviews. – 2010. – Т. 4. – №. 6. – С. 795-808.
15. Технология тонких пленок, под ред. Л.Майссела, Р.Глэнга, Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. Под ред. М.И.Елинсона, Г.Г. Смолко, Т.2. М., “Сов. радио”, 1977, 768 с.
16. *Safa K., Peter C.* Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, 2006
17. *Warrender J. M., Aziz M. J.* Morphological Evolution of Ag/Mica Films Grown by Pulsed Laser Deposition //MRS Proceedings. – Cambridge University Press, 2002. – Т. 749. – С. W3. 1.
18. *Reichelt K., Lutz H. O.* Hetero-epitaxial growth of vacuum evaporated silver and gold //Journal of Crystal Growth. – 1971. – Т. 10. – №. 1. – С. 103-107.
19. *Лютович А.С.* Ионно-активированная кристаллизация пленок, Ташкент, 1982.-148 с.
20. *González A. R.* Low energy ion assisted film growth. – 2003.