

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ПЛАЗМОНОВ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*А.Н. Довбня¹, В.В. Закутин¹, Н.Г. Решетняк¹, Ю.Е. Коляда², В.И. Федун²,
В.И. Тютюнников²*

¹*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина;*

²*Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина
E-mail: yukol@ukr.net; zakutin@kpt.kharkov.ua*

Впервые представлены экспериментальные результаты по возбуждению локализованных плазмонов электронным пучком в металлических наночастицах. Электромагнитный отклик зарегистрирован в оптическом диапазоне. Спектр возбуждаемых частот определяется концентрацией электронного газа и геометрическими размерами частиц. Применение пучков повышает эффективность энергетического обмена с металлическими наноструктурами. Полученные результаты открывают перспективы дальнейшего развития работ в области ускорения заряженных частиц светом с использованием нанорезонаторов и нановолноводов.

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько лет стремительное развитие получило одно из направлений нанофизики – наноопластика, задачей которой является изучение электромагнитных свойств отдельных металлических наночастиц и сложных наноструктур с перспективой создания наноструктур различного назначения [1]. К ним относятся: элементная база устройств передачи и обработки информации, функционирующая на оптических частотах и имеющая нанометровые размеры; высокоэффективные наноразмерные источники света; нанолазеры; наноприемники; нанорезонаторы и нановолноводы; высокоэффективные солнечные батареи.

Энергетические обменные процессы с металлической наночастицей осуществляются за счёт возбуждения плазмонов, которые обусловлены свободными и вынужденными колебаниями электронного газа относительно ионов кристаллической решётки. Возбуждение плазмонов носит резонансный характер, собственные частоты которых обусловлены концентрацией свободных носителей и геометрическими размерами наночастицы, что позволяет «настраивать» систему их резонансов на эффективное взаимодействие с квантовыми системами. При этом различают поверхностные плазмоны (делокализованные) и локализованные. В настоящее время теоретически и экспериментально установлено, что те и другие возбуждаются светом [1,2]. Поверхностные плазмоны возникают на бесконечной плоской поверхности границы раздела металл – диэлектрик при наличии наноструктуризации поверхности металла, а локализованные – в металлических кластерах или порах внутри металла с размерами, много меньшими длины волны света, т.е. в нанокластерах. Период структуры для делокализованных плазмонов также должен быть меньше длины световой волны. Поэтому излучаемые волны являются когерентными, что обеспечивает сильную пространственную локализацию этих колебаний (от ультрафиолетового диапазона до инфракрасного). В свою очередь, сильная локализация приводит к гигантскому увеличению локальных оптических и электрических полей.

Следует отметить, что сложная структура спектров плазмонных наночастиц позволяет обеспечивать как усиление поглощения, так и испускания света наночастицами и таким образом создать наноразмерные источники света с высокой плотностью энергии. По этой причине гигантские локальные поля вблизи наночастиц приводят к увеличению сечения комбинационного рассеяния на 13-14 порядков, что позволяет обнаружить отдельные молекулы [3].

С нашей точки зрения создание гигантских локальных полей, генерируемых путём возбуждения плазмонов, и применение нанорезонаторов и нановолноводов открывает перспективы реализации идеи по ускорению заряженных частиц с помощью давления света, предложенной Я.Б. Файнбергом [4], и метода ускорения светом в плазме твёрдого тела, предложенного П. Ченом и Р. Нэйблом [5,6]. Для реализации этих методов необходимо решить такие важные проблемы, как ввод светового излучения в металл и возбуждение волн плотности заряда в плазме металла. Эти проблемы могут быть успешно решены путём возбуждения света (плазмонов) электронным пучком при взаимодействии его с металлическими наноструктурами. Следует отметить, что в упомянутых работах авторы предлагали осуществлять ускорение в оптических волокнах или металлических плёнках малой толщины во избежание разрушения твёрдого тела при огромных мощностях лазерного излучения.

Как было сказано выше, до настоящего времени возбуждение плазмонов осуществлялось лишь квантами света. Применение электронных пучков для этой цели может существенно повысить эффективность энергетического обмена с металлическими наноструктурами и получить ещё более высокие значения плотности электромагнитной энергии в оптическом диапазоне.

В этой связи целью настоящей работы является экспериментальная проверка возможности возбуждения локализованных плазмонов электронным пучком в металлических наночастицах, определение характеристик оптического излучения и механизмов пучково-плазмонного взаимодействия.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема эксперимента изображена на Рис.1. Электронный пучок формировался в мощной магнетронной пушке коаксиального типа с холодным вторично-эмиссионным катодом, принцип работы которой и

подробное описание приведены в [7]. Диаметр катода 40 мм, внутренний диаметр анода 70 мм, длина катода 70 мм, длина анода 140 мм; материал катода – медь, анода – нержавеющая сталь. В качестве мишени использовались материалы, располагаемые в области цилиндра Фарадея.

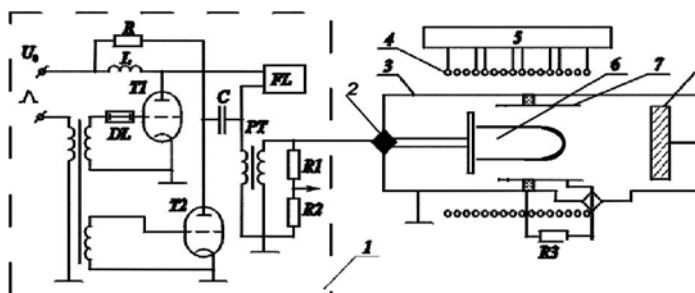


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – импульсный генератор; 2 – в/в изолятор; 3 – вакуумная камера; 4 – соленоид; 5 – источник питания соленоида; 6 – катод; 7 – анод; 8 – цилиндр Фарадея

Для обеспечения работы холодного вторично-эмиссионного катода на последний подавался запускающий импульс высокого напряжения специальной формы, который формировался импульсным генератором. Амплитуда его регулировалась в пределах 60...100 кВ, длительность заднего фронта ~ 0,3 мкс. Амплитуда плоской части импульса 20...55 кВ, длительность импульса на полувысоте ~ 8 мкс, частота следования импульсов 2...20 Гц.

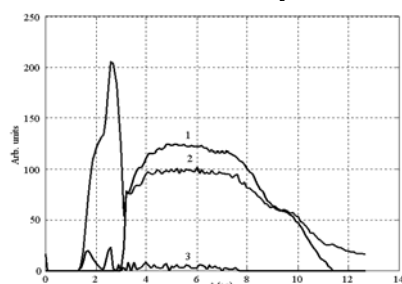


Рис.2. Импульсы напряжения (2), тока пучка (1) и анодного тока (3). По вертикали: 1 – 0,4 А/дел. 2 – 0,5 кВ/дел. 3 – 0,04 А/дел.

Магнетронная пушка размещалась в вакуумной камере с остаточным давлением ~ 10^{-6} Торр. Магнитное поле для генерации и транспортировки пучка создавалось соленоидом (состоящим из 4 секций), питание которого осуществлялось от источника постоянного тока. Величина магнитной индукции достигала ~ 0,12 Тл. В такой пушке формировался трубчатый электронный пучок с током до 50 А при амплитуде напряжения на катоде до 50 кВ. Геометрические размеры пучка в данном эксперименте составляли: наружный диаметр 40 мм, толщина стенки 2 мм. Импульсная мощность пучка достигала 2,5 МВт. На Рис.2 приведены характерные осциллограммы запускающего импульса высокого напряжения, тока пучка (1), ускоряющего напряжения (2) и анодного тока (3). В качестве мишени использовалась гладкая медная пластина.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель проводимых экспериментов – установить возможность возбуждения оптического излучения при взаимодействии электронного пучка средней энергии с поверхностью металлов.

Облучению подвергалась мишень в виде медной гладкой пластины. При этом осуществлялась видеосъемка в оптическом диапазоне частот участка поверхности, на который осаждался электронный пучок. В режиме съёмки частота импульсов пучка уменьшалась до 2 Гц, что было обусловлено ограниченной частотой кадров видеосистемы. Выбор медной мишени обусловлен относительно низкой температурой плавления ~1100 °С, по сравнению, например, с железом или другими тугоплавкими металлами. При указанной температуре плавления меди максимум спектральной плотности энергетической светимости теплового излучения лежит в далёкой инфракрасной области. По этой причине указанный механизм излучения не вносит существенного вклада в исследуемый оптический диапазон частот. Кроме того, участки мишени до облучения и после исследовались при помощи оптического микроскопа с коэффициентом увеличения до 1000.

Ниже приведены результаты наблюдений, полученные при энергии пучка 30 кэВ и поверхностной плотности энергии в импульсе 10 Дж/см². Средняя длина свободного пробега электронов в меди при этой энергии составляет величину порядка 20 мкм.

В результате взаимодействия электронного пучка с металлической мишенью зарегистрировано излучение в оптическом диапазоне частот. Следует отметить, что характер свечения мишени изменялся во времени.

На фото Рис.3 представлен кадр видеосъёмки, характерный для взаимодействия пучка с мишенью в течение первых десяти импульсов (режим 1). А на Рис.4 – фото этого же участка, полученного после первых десяти импульсов (режим 2).

На этих фотографиях хорошо видна дуга окружности кольцевого пучка диаметром 4 см. В качестве единицы масштаба дуга разделена радиальной меткой толщиной 1 мм. Сравнительный анализ результатов, наблюдаемых в режимах 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы. В режиме 1 в системе зафиксировано ухудшение вакуума, что обусловлено фактом обезгаживания мишени (десорбцией газа с её поверхности) при взаимодействии с пучком. Свечение происходит за счёт возбуждения атомов и молекул, поступивших в объём поверхности меди.

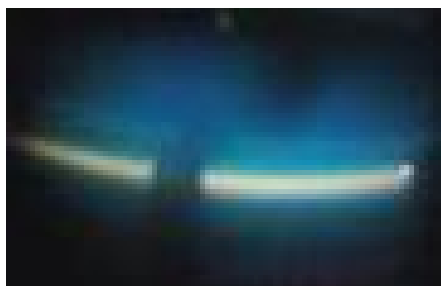


Рис.3. Область взаимодействия пучка с мишенью в режиме 1. Разрыв свечения составляет 1 мм

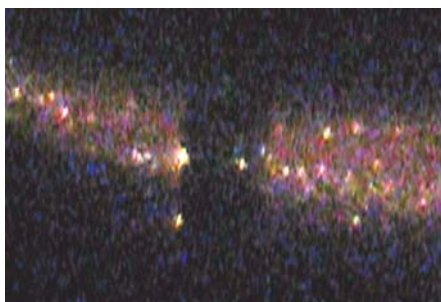


Рис.4. Область взаимодействия пучка с мишенью в режиме 2. Разрыв свечения составляет 1 мм

Область свечения значительно превосходит апертуру пучка. Вполне очевидно, что наблюдаемое явление обусловлено развитием в газе пучково-плазменного разряда при наличии магнитного поля [8]. В области апертуры пучка, которая просматривается достаточно контрастно, свечение практически однородно. После обезгаживания мишени на фотографии (Рис.4) видны многочисленные точечные источники света различного размера, излучающие свет в широком диапазоне частот. Источники света локализованы только в области апертуры пучка – режим 2. Этот режим стабилен и не меняется в течение длительного времени.

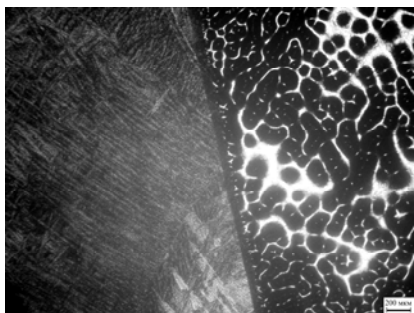


Рис.5. Граница раздела необлученной и облученной электронным пучком областей мишени. Справа внизу приведена метка 200 мкм

На Рис.5 представлена фотография границы раздела необлученной и облученной электронным пучком областей мишени, из которой следует, что вне апертуры пучка поверхность мишени гладкая и однородная, а в области осаждения электронов поверхность становится пористой, неоднородной и шероховатой. Это является причиной оплавления металла. На поверхности имеются каверны и острия различных размеров.

На фотографии (Рис.6) приведено изображение облученной области с большим увеличением. Видны частицы и капли расплавленного металла микроскопического размера.

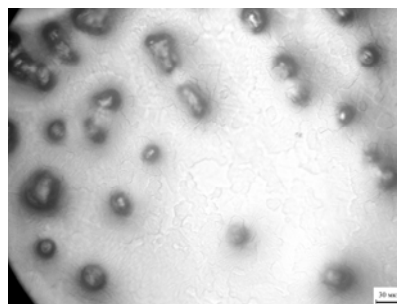


Рис.6. Область мишени, облученная электронным пучком. Справа внизу приведена метка 30 мкм

На Рис.7 представлена фотография нескольких каверн со значительно большим увеличением – 1000. Видно, что характерный размер структурных неоднородностей близок к нанодиапазону.

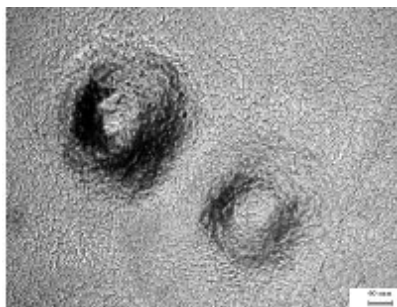


Рис.7. Область мишени, облученная электронным пучком. Справа внизу приведена метка 4 мкм

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате взаимодействия электронного пучка с поверхностью медной мишени зарегистрировано её свечение в оптическом диапазоне частот. Выделено 2 режима: режим 1 и режим 2. Как было сказано в предыдущем разделе, свечение в режиме 1 происходит при обезгаживании поверхности за счёт развития пучково-плазменного разряда в атмосфере адсорбированного газа в магнитном поле. Это излучение объёмное (поперечные размеры области свечения превышают апертуру пучка), и оно прекращается после газовой очистки поверхности. В дальнейшем этот режим обсуждению не подлежит.

В режиме 2 зафиксировано устойчивое свечение локализованных центров, возникших на поверхности металла. Пространственное распределение их дискретно, центры свечения имеют разные размеры и излучают свет в различном диапазоне длин волн. Возникновение свечения на поверхности твёрдого тела при облучении его электронным пучком средних энергий, в принципе, может иметь место за счёт развития таких известных явлений как тепловое излучение, пучково-плазменный разряд в плазме свободных носителей, возбуждение эктонов и катодоллюминесценция. Рассмотрим возможность развития каждого из этих процессов в условиях эксперимента.

– Возникновение свечения за счёт теплового излучения в данном случае невозможно. Длина волны максимальной спектральной плотности энергетической светимости для теплового излучения определяется известным соотношением: $\lambda_{max} = C/T$, где C – постоянная Вина, равная $2,9 \cdot 10^{-3}$ мК; T – абсолют-

ная температура. При температуре плавления меди $\sim 1400\text{ K}$ λ_{max} лежит в далёкой инфракрасной области.

– Развитие пучково-плазменного разряда в плазме твёрдого тела в данном случае также невозможно. Инкремент развития пучковой неустойчивости γ (например, гидродинамической) определяется из соотношения [9]:

$$\gamma \approx \left(\frac{n_b}{n_p} \right)^{1/3} \omega_{pe}, \quad (1)$$

где n_b – плотность частиц пучка, n_p – плотность электронного газа в металле, ω_{pe} – электронная плазменная частота. В условиях эксперимента $n_b \sim 10^{11}\text{ см}^{-3}$ и $n_p \sim 10^{22}\text{ см}^{-3}$ инкремент, оказывается, достаточно мал.

– Возникновение точечных источников света за счёт возбуждения эктонов – лавины электронов из металла, также невозможно. Для формирования необходимы сильные электрические поля [10]. В данном случае мишень заземлена и находится под потенциалом анода.

– Католюминесценция в условиях опыта также невозможна. Способность к католюминесценции обладают чистые и легированные различными примесями полупроводники и диэлектрики, стекла и молярные кристаллы [11].

Наиболее вероятным механизмом наблюдаемого свечения в условиях эксперимента является возбуждение локальных плазмонов электронным пучком при взаимодействии его с поверхностью металла. Генерация плазмонов является наиболее сильным каналом неупругих потерь и имеет наибольшее сечение по сравнению с такими процессами как рассеяние электронов, характеристическое и тормозное рентгеновские излучения, генерация медленных, быстрых вторичных и ожэ-электронов [12]. Возбуждение плазмонов доминирует в металлах, имеющих большую поверхность Ферми, следовательно, высокую плотность свободных электронов. К этим материалам относятся медь, алюминий и т.д.

Экспериментальные результаты по генерации плазмонов электронными пучками приведены, например, в работах [13,14]. Электромагнитные отклики в оптическом диапазоне длин волн в указанных работах обнаружены не были. Следует отметить, что в указанных выше случаях изучалось возбуждение плазмонов в макрообъемах твёрдого тела.

Однако ситуация может существенно измениться, если электронный пучок будет взаимодействовать не с макрообъемом, а с металлическими нанокластерами или наночастицами. При этом плазмоны, обладая гигантским дипольным моментом, являются эффективным посредником при взаимодействии этих малых объемов со светом. Т.е. имеет место связь фотонных и электронных резонансов [1,2]. Так в [15] приведена информация (D. Hoover and A. Hann) об экспериментах по генерации света электронным пучком при взаимодействии его с тонким слоем метал-

ла, инкрустированным селеном, стеклом или пластмассами. Как указывают авторы, излучение света осуществляется наноантеннами, механизм возбуждения которых ими не установлен.

В условиях нашего эксперимента возникновение локализованных точечных источников света на поверхности металла наблюдается в режиме 2. В предыдущем разделе показано, что в этом режиме на поверхности мишени в результате бомбардировки её электронами пучка возникают микронеоднородности – острия, каверны и капли застывшего металла (см. Рис.6,7). Вполне логично заключить, что их размер распространяется в область нанодиапазона. Поэтому есть основания полагать, что локализованными точечными источниками света являются наноразмерные структуры, возникшие на поверхности предварительно гладкой мишени. Инкрустация диэлектрическими материалами в данном случае отсутствует. Интересно отметить, что характер зарегистрированного свечения, представленного на Рис.4, аналогичен свечению плазмонных наночастиц, возбужденных фотонами в работе [16] (Рис.8).

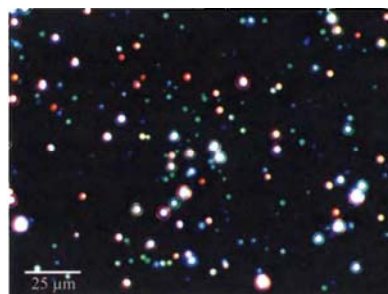


Рис.8. Изображения серебряных наночастиц различной формы и размера, полученные с помощью метода темного поля (McFarland et al., 2003) [16]

По утверждению авторов причина свечения – возбуждение локализованных плазмонов и совпадение электронных и фотонных резонансов. Вполне очевидно, что в нашем случае механизм свечения аналогичен, с тем лишь отличием, что возбуждение плазмонов осуществляется электронным пучком в металлических наноструктурах, возникших на поверхности мишени.

ВЫВОДЫ

В работе впервые зарегистрирован электромагнитный отклик в оптическом диапазоне при взаимодействии электронного пучка с металлическими наноструктурами. Это открывает возможности создания совершенно новых приборов и реализации новых методов ускорения, в частности:

– создание лазера с накачкой электронным пучком аналогично системе SPASER [17], в которой для этой цели используется свет;

– создание наноантенн, использование которых в сочетании с нановолноводами позволит реализовать ряд новых методов ускорения заряженных частиц, предложенных в [4-6];

– последующее усиление света и концентрация оптической энергии в малых объемах за счет реализации явления каустики, может оказаться весьма эффективным при радиационном ускорении заряженных частиц [4].

Дальнейшее развитие исследований в этой области должно быть направлено на изучение количественных зависимостей данного явления и создания адекватной математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.В. Климов. Наноплазмоника // *УФН*. 2008, №8, с.875-880.
2. С.Г. Тиходеев, Н.А. Гиппиус. Плазмон-поляритонные эффекты в наноструктурированных металл-диэлектрических фотонных кристаллах и метаматериалах // *УФН*. 2009, №9, с.1003-1007.
3. J. Yu, Z. Wang, K.W. Kinzler, B. Vogelstein, L. Zhang. PUMA mediates the apoptotic response to p53 in colorectal cancer cells // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2003, v.100 (4), p.1931-6.
4. Я.Б. Файнберг, В.И. Курилко. К теории метода ускорения с помощью давления света // *Теория и расчёт линейных ускорителей*. Москва: «Госатомиздат». 1962, с. 326-332.
5. P. Chen, R. Noble // *Advanced Acceleration Concepts* / Ed. S. Chattopadhyay, J. McCullough and P. Dahl, AIP Press C398, New York, 1997, p.273.
6. P. Chen, R. Nable // *New Modes of Particle Acceleration* / Ed. Z. Parsa. AIP. 1997, p.95.
7. N.I. Ayzatskiy, A.N. Dovbnya, V.V. Zakutin, N.G. Reshetnyak, V.N. Boriskin, N.A. Dovbnya, V.P. Romas'ko, I.A. Chertishev. Investigation of electron beam characteristics using an accelerator based on magnetron gun with a secondary-emission cathode // *Physics of Particles and Nuclei Letters* (5). 2008, №7, p.86-89.
8. И.Ф. Харченко, Я.Б. Файнберг, Р.М. Николаев, Е.А. Корнилов, Е.И. Луценко, Н.С. Педенко. Взаимодействие пучка электронов с плазмой в магнитном поле // *ЖТФ*. 1961, т.31, с.761-765.
9. А.И. Ахиезер, Я.Б. Файнберг. О высокочастотных колебаниях электронной плазмы // *ЖЭТФ* (21). 1951, в.11, с.1262-1269.
10. Г.А. Месяц. Эктон-лавины электронов из металла // *УФН* (165). 1995, №6, с.601-626.
11. А.В. Москвин. *Катодоллюминесценция*. Москва: «ОГИЗ». 1948.-Ч.1, 348 с.
12. *Физическая энциклопедия* / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Балдин, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. М.: Большая Российская энциклопедия. 1992, т.3, с.672, ил.
13. H. Raether. *Excitation of plasmons and interband transition by electrons*. Springer – Verlag. 1980, p.192.
14. Е.М. Байтингер, М.М. Бржезинская, Н.А. Векесер, В.В. Шнитов. Об особенностях дисперсии плазмонов в графите // *Известия Челябинского научного центра. Общая и техническая физика* (39). 2008, в.1, с.36-39.
15. Advanced Plasmonics, Inc announced its first Plasmon Enabled Device (PED) capable of generating light using previously unknown principles. http://aplasmonics.com/news/press_05_26_06.php
16. В.В. Климов. *Наноплазмоника*. Москва: «Физматлит». 2009, с.480.
17. D.J. Bergman, M.I. Stockman. Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Quantum Generation of Coherent Surface Plasmons in Nanosystems // *Phys. Rev. Lett.* (90). 2003, №2, 027402:1-4.

Статья поступила в редакцию 23.02.2012 г.

EXCITATION OF NONCOMMUNICATIVE PLASMON'S AN ELECTRON BEAM

A.N. Dovbnya, V.V. Zakutin, N.G. Reshetnyak, Yu.E. Kolyada, V.I. Fedun, V.I. Tyutyunnikov

Experimental results are first presented on excitation of noncommunicative plasmons an electronic bunch in metallic nanoparticles. An electromagnetic response is incorporated in an optical range. The spectrum of the excited frequencies is determined by the concentration of electronic gas and geometrical sizes of particles. Application of bunches is promoted by efficiency of power exchange with metallic nanostructures. The got results open the prospects of further development of works in area of charged particles acceleration by light with the use of nanoresonators and nanowaveguide.

ЗБУДЖЕННЯ ЛОКАЛІЗОВАНИХ ПЛАЗМОНІВ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ

А.М. Довбня, В.В. Закутін, М.Г. Решетняк, Ю.Є. Коляда, В.І. Федун, В.І. Тютюнников

Вперше представлені експериментальні результати по збудженню локалізованих плазмонів електронним пучком у металевих наночастинок. Електромагнітний відгук зареєстрований в оптичному діапазоні. Спектр збуджених частот визначається концентрацією електронного газу і геометричними розмірами частинок. Застосування пучків підвищує ефективність енергетичного обміну з металевими наноструктурами. Отримані результати відкривають перспективи подальшого розвитку робіт в області прискорення заряджених частинок світлом з використанням нанорезонаторів і нанохвилеводів.