

На рис. 5 приведены примеры расчета коллекторов с трехмерными электрическими и магнитными полями.

Л и т е р а т у р а

1. Блейвас И. М., Невский П. В., Руденко Б. В. и др.// Методы расчета электронно-оптических систем. — М.: Наука, 1977. С. 25.
2. Блейвас И. М., Ильин В. П., Урев М. В., Юдин А. Н.// Методы расчета электронно-оптических систем: Тез. докл. научн.-техн. конф. — Ташкент: Изд-во "Фан", 1988. С. 4.
3. Рыбачек В. П.//В сб. "Вакуумная и газоразрядная электроника". — Рязань, 1984. С. 102.
4. Журавлева В. Д., Rogovin В. И., Семенов С. О.// Методы расчета ЭОС: Тез. докл. X всесоюзного семинара. — Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1990. С. 105.
5. Голенцкий И. И., Духина Н. Г., Будзинский Ю. А. и др.// ВЧ-техника и телеком. технологии (КрыМиКо 2001): Матер. 11-й междунар. конф. — Севастополь. Украина, 2001. С. 216.
6. Coco S., Emma F., Laudani A. et al.// IEE Trans. on ED, Jan. 2001. V. 48. № 1. P. 24.
7. Greenfield D. E., Monastyrskii M. A.// Proc. of SPIE, 2001. V. 5025. P. 1.
8. Pettilo J., Eppley K., Panagos D. et al.// Proc. Third IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2002). Monterey. CA. USA, 2002. P. 156.
9. Ives L., Vui T., Datta D. et al.// Ibid. P. 118.
10. Savvin V., Bugaev S., Kazarjan G. et al.// Ibid. P. 358.
11. Корнеев В. Н.// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1979. Вып. 5. С. 84.
12. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрооптики. — Новосибирск: Наука, СО. 1974.
13. Журавлева В. Д., Rogovin В. И., Семенов С. О.// Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. — Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1998. С. 187.
14. Морз Р. Вычислительные методы в физике плазмы. — М.: Мир, 1974.
15. Semenov S. O., Zhuravleva V. D., Rogovin V. I.// Proc. Fourth IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2003). Seoul. Korea. 2003. P. 381.
16. Рошаль А. С. Моделирование заряженных пучков. — М.: Атомиздат, 1979.
17. Begum R., Chesnut M., Legarra J. et al.// Proc. Fifth IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2004). Monterey. CA. USA. 2004. P. 130.
18. Ильина Е. М., Морев С. П., Rogovin В. И. и др.// РЭ, 1999. Т. 44. № 10. С. 1271.
19. Баяковский Ю. М., Галактионов В. А., Михайлова Т. Н. Графор. Графическое расширение фортрана. — М.: Наука, 1985.
20. Кацман Ю. А. Приборы СВЧ. — М.: Высшая школа, 1983. С. 167.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Complex of codes for 3D electron-optic systems calculation

V. D. Zhuravleva, S. O. Semenov

Federal State Unitary Enterprise «NPP "Almaz"», Saratov, Russia

This paper describes complex of codes for single and multiple-beam 3D electron-optic system modeling that consist of following elements: electron gun code, transporting and focusing system code, multistage depressed collector code and post-processor. The simulation results of microwave devices element are presented.

УДК 537.533

Определение параметров подповерхностных структур образца с помощью энергетического спектра вторичных электронов

С. С. Борисов, Е. А. Грачев, А. Блошенко, Т. Мисютин

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

С. И. Зайцев

Институт проблем технологий микроэлектроники РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

С помощью разработанной программы моделирования методом Монте-Карло в приближении дискретных потерь проводится анализ энергетических спектров (ЭС) вторичных электронов (ВЭ). Показана возможность определения толщин и глубин залегания подповерхностных структур по ЭС ВЭ.

Создание и использование устройств, позволяющих анализировать с высоким разрешением (<1 %) [1] спектр отраженных электронов, расширили диагностические возможности РЭМ. Появилась обоснованная надежда на использование спектров для решения томографических задач.

Как было показано в [2], ранее широко использовавшееся приближение непрерывных потерь (ПНП) неспособно правильно описывать многие величины, характеризующие процессы рассеяния электронов в веществе, в частности, энергетические спектры электронов, прошедших тонкую пленку вещества. Поэтому была разработана программа на основе приближения дискретных потерь (ПДП), алгоритм которой учитывает все существенные сечения рассеяния по отдельности. Метод Монте-Карло в ПДП фактически является имитационным для задачи рассеяния электронов в твердых гетерогенных средах.

В [2] было показано, что получаемые в ПДП энергетические спектры вторичных электронов качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными в отличие от результатов, даваемых ПНП. Это позволяет моделировать рассеяние электронов пучка в сложных гетерогенных средах, получать модельные изображения многослойных микроструктур и рельефа поверхности в обратноотраженных (с энергией $E > 50$ эВ) и истинно-вторичных ($E < 50$ эВ) электронах в растровом электронном микроскопе.

Результаты моделирования

Рассмотрим результаты моделирования многослойных структур, например структуры, изображенной на рис. 1.

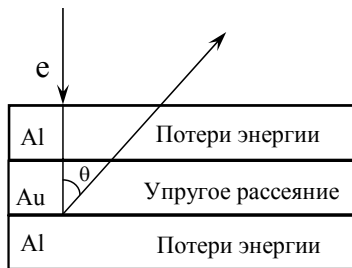


Рис. 1. Схема распределения взаимодействий в трехслойной структуре типа Al—Au—Al

В золоте преобладает упругое взаимодействие электронов с ядрами, а в алюминии — потери электронами энергии на ионизацию. Таким образом, условия рассеяния в каждом из материалов существенно различаются — достигнув золота, электроны начинают сильно рассеиваться. Каждый диапазон энергии спектра ВЭ соответствует некоторому среднему пробегу электрона, следовательно, несет в себе информацию о пройденных слоях — спектры "суммируются". На рис. 1 заглубленный слой обладает большим коэффициентом отражения, и на ЭС в диапазоне энергий, соответствующих глубине залегания слоя, появляется пик. Площадь разницы спектров структуры без внутреннего слоя и со слоем, очевидно, пропорциональна величине слоя, а по положению максимума дополнительного пика можно судить о глубине его залегания.

Получается, что если вычестить из спектра составной структуры спектр Al (подложки), то по положению максимума энерговыведения можно судить о глубине залегания слоя, а по площади — о толщине слоя Au. Причем положение максимума можно вычислить для заданной топологии а priori исходя из средних потерь энергии. Таким образом, появляется возможность измерять параметры (толщину, глубину залегания или тип материала) заглубленных слоев.

На рис. 2, а представлена группа спектров, соответствующих трехслойным структурам из 150 нм Al, слоя Au толщиной 5—65 нм и подложки Al, полученных в ПДП. На рис. 2, б представлены аналогичные кривые, но полученные в ПНП.

Как уже указывалось в [2], ПНП не позволяет корректно моделировать энергетические спектры из-за наличия зоны запрещенных потерь — зоны энергий спектра, в которую вторичные частицы не попадают, так как электрон не может потерять энергии меньше, чем потери на прохождение траектории минимальной длины ($E = \int_0^l \frac{dE}{dx} dx$, где l — толщина пленки вещества), и

энергетический спектр образуется за счет разброса длин траекторий, в то время как в ПДП вклад в форму спектра вносят еще и флуктуации потери энергии. Поэтому спектры, получаемые в ПНП, непригодны к рассматриваемому анализу.

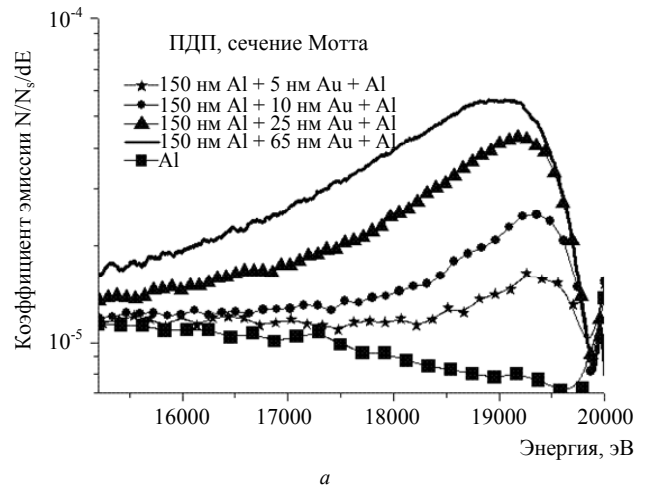
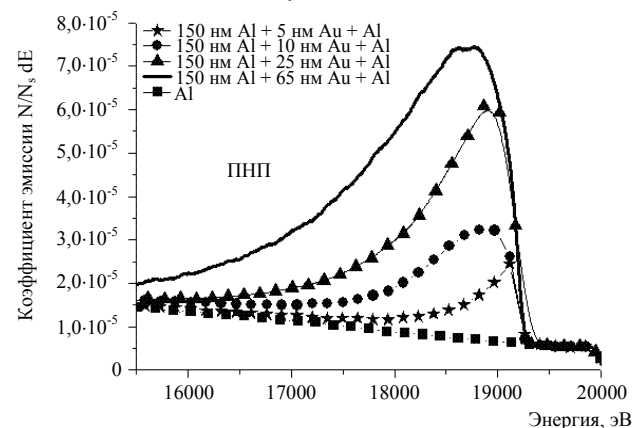


Рис. 2. Группа спектров, соответствующих трехслойным структурам Al—Au—Al: а — полученные в ПДП;



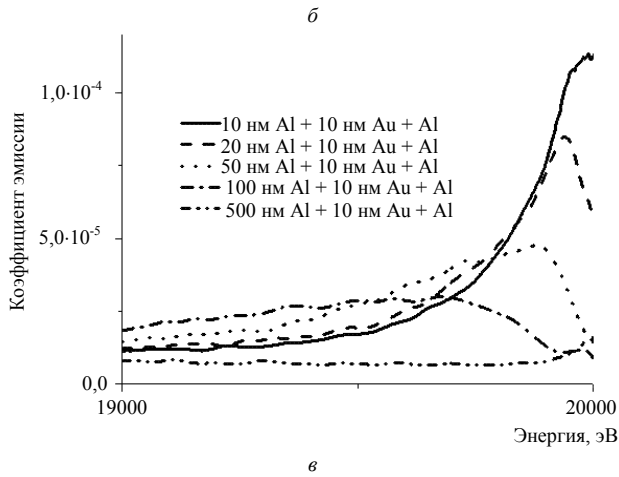


Рис. 2. Окончание.

б — полученные в ПНП; в — в случае переменной толщины слоев

На рис. 2, в дана группа спектров для случая переменной толщины внешнего слоя Al (10—100 нм) и слоя в 10 нм Au на Al-подложке.

Из рис. 3, на котором изображены положения центров слоев Au для случаев переменной толщины слоя, видно, что зависимость положения максимума пика практически линейна в достаточно широком диапазоне толщин и хорошо описывается средними потерями.

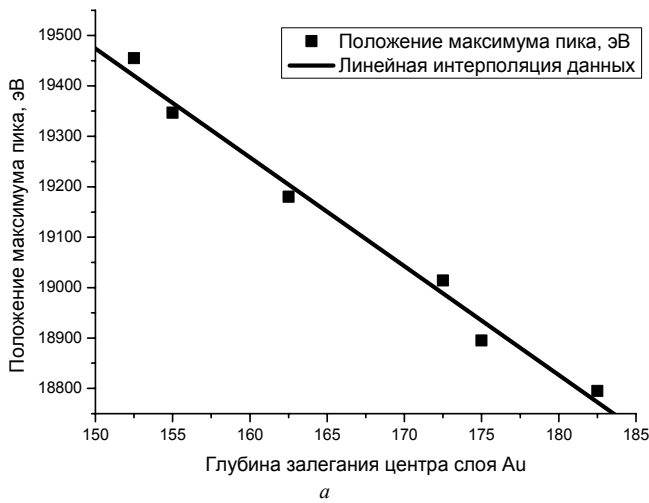


Рис. 3. Положение максимума энергосвечения от глубины залегания:
а — центра слоя Au;

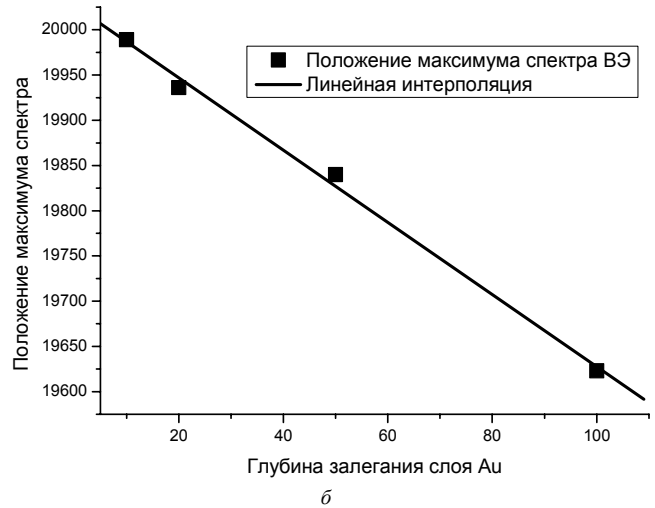


Рис. 3. Окончание.

б — слоя Au

Из рис. 4 видно, что площадь разницы спектров также линейно связана с толщиной промежуточного слоя.

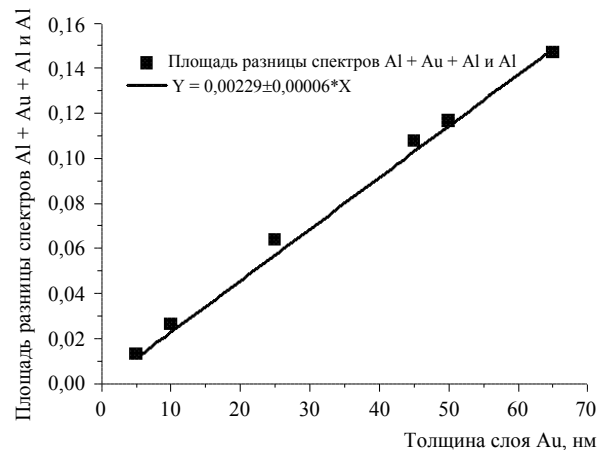


Рис. 4. Зависимость площади разницы спектров от толщины промежуточного слоя

Выводы

Для количественного расчета параметров слоистых структур разработана простая модель, которая вполне корректна, если глубина залегания слоя не превышает транспортную длину быстрых электронов в легком материале, а толщина слоя не превышает транспортную длину в тяжелом материале. Полученные зависимости позволяют измерять толщины и глубину залегания подповерхностных структур, а в случае наличия информации о геометрии таких структур — определять тип составляющего их вещества.

В приведенном примере можно наблюдать и измерять параметры слоев толщиной вплоть до ~1 нм Au под 150-нм слоем Al.

Л и т е р а т у р а

1. Rau E. I., Robinson V. N. E.// Scanning. 1996. V. 18. P. 556—561.

2. Борисов С. С., Грачев Е. А., Зайцев С. И. Моделирование взаимодействия электронного пучка с гетерогенными средами мето-

дом Монте-Карло в приближении дискретных потерь// Прикладная физика. 2004. № 3. С. 65.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Definition of parameters of subsurface structures for a sample through an energy distribution of secondary electrons

S. S. Borisov, E. A. Grachev, A. Bloshenko, T. Misutina
Moscow State University, Physical Faculty, Moscow, Russia

S. I. Zayitsev

Institute for Problems of Microelectronics Technologies, Chernogolovka, Moscow, Russia

The analysis of energy distributions for secondary electrons is made with the help of the program for model operation by a Monte-Carlo method in approach of discrete losses. Shown is an opportunity of definition of thicknesses and stratification depths of subsurface structures by energy distributions of secondary electrons.

УДК 621.385.029.647

Формирование частично-замагниченного многолучевого пучка в мощном клистроне для сверхпроводящих линейных электрон-позитронных коллайдеров

А. В. Ларионов

Физико-технический центр ФИАН им. П. Н. Лебедева, г. Протвино, Россия

Представлены результаты моделирования электронно-оптической системы, предложенной и разработанной для мощного многолучевого клистрона Toshiba E3736 — шести-лучевого клистрона L-диапазона с выходной мощностью 10 МВт, разрабатываемого для сверхпроводящих ускорительных проектов ILC, TESLA (XFEL). Ключевые особенности прибора: новая компактная схема формирования частично-замагниченного пучка, наиболее низкая по сравнению с аналогами нагрузка катодов ($< 2,1 \text{ А/см}^2$), управляемый размер (диаметр) лучей в пролетных трубах клистрона.

В настоящее время мощные многолучевые клистроны L-диапазона рассматриваются как основной тип ВЧ-источников для питания будущих сверхпроводящих линейных электрон-позитронных коллайдеров. Использование таких приборов предполагается, в частности, в проектах TESLA (XFEL) и ILC. Известный и разработанный для этих целей клистрон Thales TH1801 [1] уже используется на TTF (Tesla Test Facility) и демонстрирует КПД на уровне 65 % при выходной мощности 10 МВт. Однако существенным недостатком этого прибора является высокая плотность тока на катоде, составляющая $5,5 \text{ А/см}^2$, и как следствие ограниченный срок службы.

Как попытку кардинального решения этой проблемы можно рассматривать развиваемый в настоящее время многолучевой клистрон СРІ VKL-8301 [2]. Конструкция этого прибора представляет собой пакет, состоящий из шести независимых однолучевых клистронов, которые связаны между собой по ВЧ на входе и выходе с помощью кольцевых резонаторов на высшем

типе колебаний. Использование резонаторов на высшем типе колебаний позволяет увеличить расстояние между лучами (клистроны), диаметр катодов и относительно легко решить задачу формирования лучей. Проектная плотность тока на катоде в VKL-8301 составляет $2,5 \text{ А/см}^2$, а ожидаемый срок службы превышает 100 000 ч. Очевидным недостатком подхода СРІ являются сложность и громоздкость всей конструкции клистрона, что, вероятно, скажется на его стоимости.

Лучшей, на наш взгляд, альтернативой указанным выше клистроном является разрабатываемый в настоящее время клистрон Toshiba E3736, оптическая система которого рассматривается ниже. Основные особенности этого прибора следующие:

- новая компактная схема фокусировки частично-замагниченного пучка, позволяющая использовать в клистроне кольцевые резонаторы, работающие на основной моде;
- наиболее низкая по сравнению с аналогами нагрузка катодов ($< 2,1 \text{ А/см}^2$);