

К. ф.-м. н. Д. МЕЛЕБАЕВ, Г. Д. МЕЛЕБАЕВА,
д. ф.-м. н. Ю. В. РУДЬ, д. ф.-м. н. В. Ю. РУДЬ

Туркменистан, г. Ашхабад, Туркменский гос. ун-т им. Магтымгулы;
Россия, г. Санкт-Петербург, Физико-технический ин-т им. А. Ф. Иоффе,
СПб гос. политехнический университет
E-mail: dmelebay@yandex.ru, yuryrud@mail.ioffe.ru, rudvas@spbstu.ru

Дата поступления в редакцию
12.07.2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

СПЕКТРЫ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР Ni–n-GaAs

Установлено, что фоточувствительные структуры Ni–n-GaAs при освещении со стороны полупрозрачного слоя никеля практически не реагируют на свет в фаулеровской области спектра $h\nu=0,9\ldots 1,25$ эВ.

Фоточувствительные структуры на основе арсенида галлия с барьером Шоттки являются одними из наиболее перспективных структур для создания быстродействующих и радиационно стойких полупроводниковых приборов, используемых в современной опто- и микроэлектронике [1]. В работе [2] показана возможность создания силовых диодов с барьером Шоттки на основе структур Ni–n-GaAs, изготовленных химическим методом. Экспериментальное исследование спектра фоточувствительности поверхностно-барьерных структур Ni–n-GaAs говорит о возможности создания на их основе новых фотоэлектрических полупроводниковых приборов [3, 4].

Вопрос о том, как вычислить высоту барьера Шоттки (φ_{B0}) на контакте «металл (m)–полупроводник (s)», является, несмотря на многолетние исследования, актуальной задачей теории полупроводников [5]. В данном контексте несомненный интерес представляют фоточувствительные поверхностно-барьерные структуры Ni–n-GaAs. Высота барьера таких структур в основном определяется вольт-амперным и вольт-фарадным методами [6], а фотоэлектрический метод [7], основанный на измерении спектра фототока при освещении структур со стороны полупрозрачного слоя никеля, практически не применяется.

В работе [8] была сделана попытка определить высоту барьера для структур Ni–n-GaAs при освещении со стороны полупрозрачного никеля. Однако в фаулеровской области спектра ($h\nu=0,9\ldots 1,25$ эВ) чувствительности у структуры не было. Причина этого явления в литературе не обсуждалась. С целью выяснения этого вопроса мы использовали метод сравнения спектра фототока исследуемых структур Ni–n-GaAs и контрольных структур Au–n-GaAs при идентичных условиях эксперимента.

В настоящей работе исследуются спектры фоточувствительности структур Ni–n-GaAs и Au–n-GaAs

при освещении *m*–*s*-перехода со стороны полупрозрачного слоя металла в диапазоне энергий фотонов $h\nu=0,9\ldots 2,3$ эВ. Одновременно сравниваются спектры фоточувствительности Ni–n-GaAs и Au–n-GaAs в указанном диапазоне энергий фотонов для выяснения причины отсутствия фототока структур Ni–n-GaAs в фаулеровской области спектра.

Объектом исследования служили структуры Ni–n-GaAs/ n^+ -GaAs и Au–n-GaAs/ n^+ -GaAs. В качестве подложек использовались n^+ -GaAs ($n^+=8\cdot 10^{17}$ см $^{-3}$) пластинки толщиной примерно 250 мкм, изготовленные методом Чохральского. Активные слои n-GaAs ($n=N_d-N_a=(2\ldots 4)\cdot 10^{15}$ см $^{-3}$) толщиной 20–40 мкм выращивались методом жидкостной эпитаксии [9]. Омический контакт к подложке n^+ -GaAs изготовлялся сплавлением сплава, содержащего In+3%Te в атмосфере очищенного водорода при температуре около 500°C. Полупрозрачный барьерный контакт к активному эпитаксиальному слою n-GaAs создавался химическим нанесением слоя Ni по методике [8].

Никель осаждался из водного раствора сульфат-диаммония-никеля $[\text{Ni}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ и сульфат-гидразиния $[(\text{N}_2\text{H}_6)\cdot \text{SO}_4]$. Температура осаждения 90–95°C. Нашатырный спирт (NH_4OH) добавлялся до pH=10. Контрольный образец Au–n-GaAs на основе эпитаксиальных структур также создавался химическим осаждением слоя золота из водного раствора HAuCl_4 (4 г/л)+HF (100 мл/л) при комнатной температуре [10]. Толщина слоя никеля и золота, по эллипсометрическим данным, составляла 160–250 Å. Перед химическим осаждением слоя никеля либо золота поверхность эпитаксиальных слоев n-GaAs обрабатывалась в бром-метилом травителе 4%Br $_2$ + 96%CH $_3$ OH [11].

Площадь барьерного контакта (*S*) у разных структур составляла 0,03–0,1 см 2 . К омическому и барьерному контактам с использованием индия припаивались серебряные провода.

Исследуемые Ni–n-GaAs- и контрольная Au–n-GaAs-структуры (см. таблицу) обладали фоточувствительностью при освещении со стороны полупрозрачного слоя металла (Ni, Au). Измерялись вольт-фарадные (*C*–*U*) характеристики и спектр фототока короткого замыкания ($I_{\text{ф}}-h\nu$). Все измерения выполнены при комнатной температуре (300 K).

Публикуется в качестве дискуссионной. Работа поддержана программой ОФН РАН «Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах».

Параметры энергетических диаграмм структур
«металл—полупроводник GaAs»

Структура	S , см ²	N_d-N_a , см ⁻³	E_{m0} , В/см	$q\Phi_{B0}$, эВ ($C-U$)	$q\Phi_{B0}$, эВ ($I_0-h\nu$)**
1. Ni-n-GaAs	0,055	$2,1 \cdot 10^{15}$	$2,0 \cdot 10^4$	0,900	—
2. Ni-n-GaAs	0,050	$2,0 \cdot 10^{15}$	$1,9 \cdot 10^4$	0,901	—
3. Ni-n-GaAs	0,054	$2,6 \cdot 10^{15}$	$2,2 \cdot 10^4$	0,895	—
4. Au-n-GaAs*	0,048	$3,6 \cdot 10^{15}$	$2,8 \cdot 10^4$	0,887	0,89

* — контрольная структура; ** — освещение производилось со стороны полупрозрачного слоя металла.

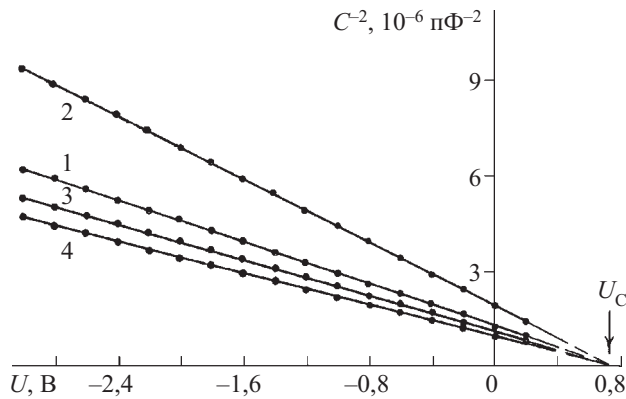


Рис. 1. Экспериментальная зависимость квадрата обратной дифференциальной емкости C^{-2} от напряжения U $m-s$ -структур Ni-n-GaAs (1—3) и Au-n-GaAs (4) при комнатной температуре (обозначения графиков соответствуют номерам структур в таблице)

Для определения параметров энергетической диаграммы структур «металл—полупроводник GaAs» измерялись вольт-фарадные характеристики на частоте 1 МГц. Зависимость дифференциальной барьерной емкости C от напряжения на потенциальном барьере U в координатах $1/C^2-U$ ($U=-3,0...+0,4$ В) для всех исследованных структур линейная (рис. 1), что соответствует теории Шоттки. Это позволило определить высоту барьера Шоттки ($q\Phi_{B0}$) непосредственно из значения емкостного напряжения отсечки U_C :

$$q\Phi_{B0} = qU_D - \mu = qU_C + kT - \mu,$$

где U_D — диффузионный потенциал;

μ — энергия уровня Ферми в объеме полупроводника, отсчитанная от дна зоны проводимости.

Величина напряжения отсечки, полученная как точка пересечения графиков этой зависимости с осью абсцисс, составляла $U_0^C = U_C = 0,74$ В. Для структур Ni-n-GaAs и Au-n-GaAs значение U_C оказалось одинаковым (см. рис. 1) при незначительном изменении концентрации N_d-N_a . Разность концентраций ионизованных доноров и акцепторов (N_d-N_a), определенная из $C-U$ -характеристики, и значения высоты барьера $q\Phi_{B0}$ для разных исследованных GaAs $m-s$ -структур приведены в таблице.

Спектр фототока короткого замыкания Ni-n-GaAs- и Au-n-GaAs-структур измерялся с помощью монохроматора ДМР-4, источником служила лампа СИ-8-200. Высокая чувствительность в области спек-

тра 1—2,8 эВ достигалась применением системы синхронного детектирования. Абсолютное значение квантовой эффективности исследованных фотодиодных структур в области энергии фотонов $h\nu = 1...2,3$ эВ определялось с помощью эталонных фотоприемников, откалиброванных в интервале 1—5,4 эВ. Полученные фотодиоды Шоттки, согласно данным измерений стационарных вольт-амперных характеристик, можно отнести к идеальным ($\beta < 1,1$), максимальная фоточувствительность (S_p , А/Вт) которых при освещении со стороны полупрозрачного металла (Ni, Au) для разных структур находится в пределах 0,11—0,15 А/Вт ($h\nu = 2,2$ эВ). В спектральных измерениях освещаемая площадь $m-s$ -перехода составляла примерно 0,01 см². (Фототок приведен к равному числу падающих фотонов.)

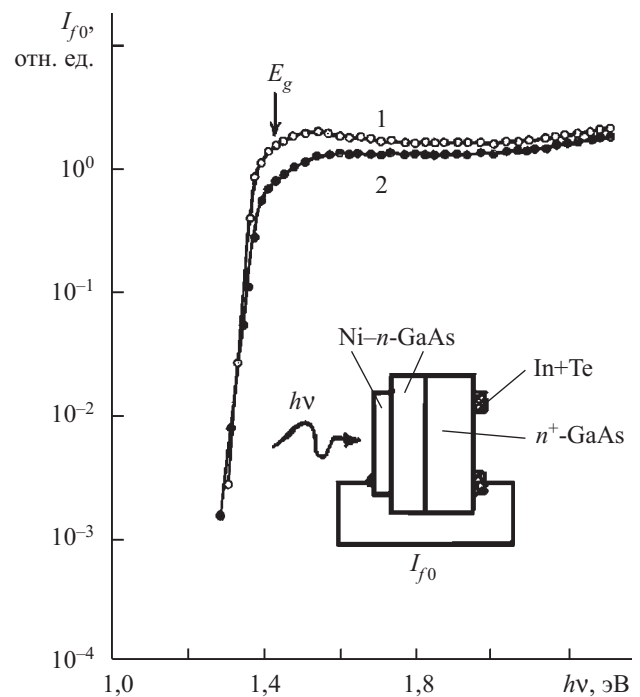


Рис. 2. Зависимость фототока (I_0) от энергии фотонов ($h\nu$) для $m-s$ -структур 1 и 2 (см. табл.) при комнатной температуре. На вставке схема измерения фототока короткого замыкания I_0 в структурах 1 и 2

Типичные спектральные характеристики фоточувствительных структур Ni-n-GaAs в области энергии фотонов 1,3—2,3 эВ при освещении со стороны полупрозрачного слоя Ni представлены на рис. 2. Здесь видно, что фоточувствительность структур Ni-n-GaAs при значениях энергии фотонов $h\nu$, близких (и больших) к ширине запрещенной зоны E_g ($h\nu = 1,3... 2,3$ эВ), обусловлена возбуждением электронно-дырочных пар в полупроводнике (GaAs) и разделением их полем поверхностного потенциального барьера (E_{m0}).

По зависимости I_0 от $h\nu$ [12] на этом участке определена ширина запрещенной зоны n -GaAs (рис. 2 и 3), и она составляет 1,43 эВ при 300 К. Спектр фототока при значениях энергии фотонов $h\nu > E_g$ для структур Ni-n-GaAs изучался в [4], а для структур

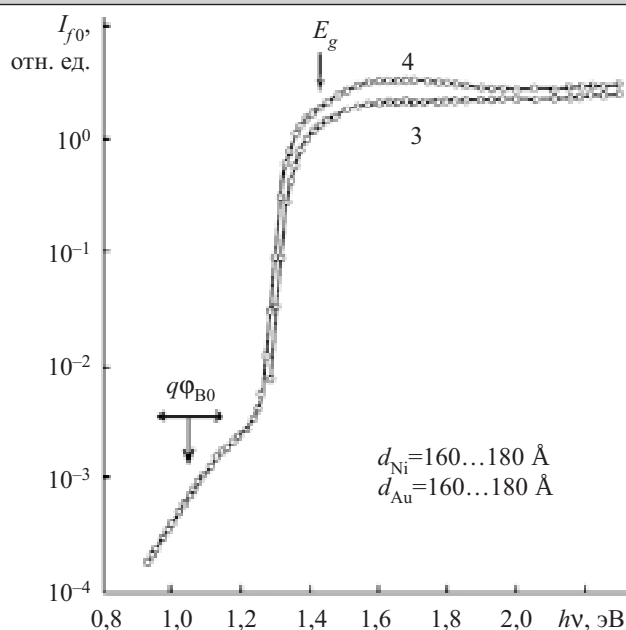


Рис. 3. Спектр фототока короткого замыкания m - s -структур Ni- n -GaAs (3) и Au- n -GaAs (4) (см. табл.) при комнатной температуре

Au- n -GaAs — в [13], и в настоящей работе не рассматривается.

Как известно [14], если энергия фотонов $h\nu$ больше высоты барьера $q\Phi_{B0}$, но меньше E_g , фоточувствительность структур Ni- n -GaAs должна быть обусловлена фотоэмиссией электронов из никеля в арсенид галлия, и для этого участка должно выполняться соотношение $I_{f0} \sim (h\nu - q\Phi_{B0})^2$. Как показал эксперимент (рис. 2), при освещении структур Ni- n -GaAs со стороны слоя никеля фотонами с энергией $h\nu < 1,3$ эВ в слое никеля не создаются возбужденные электроны (эмиссии электронов из металла и перехода их в полупроводник не происходит). Это наблюдается в нескольких Ni- n -GaAs-структурах (рис 2, кривые 1, 2; рис 3, кривая 3).

Для объяснения обнаруженных явлений проведен сравнительный анализ спектров фототока короткого замыкания структур Ni- n -GaAs и Au- n -GaAs (рис. 3) при освещении со стороны полупрозрачного слоя металла (Ni, Au).

Из литературы (например [13]) известно, что в контрольных структурах Au- n -GaAs полупрозрачный слой золота пропускает ближнее инфракрасное излучение ($h\nu = 0,8 \dots 1,3$ эВ). Однако такое пропускание у пленки никеля в структурах Ni- n -GaAs не известно, и для этих структур высота барьера при освещении со стороны слоя Ni никем не была определена. Поэтому в данной работе особое внимание уделяется исследованию фоточувствительности в фаулеровской области спектра.

Результаты измерений фототока I_{f0} показали, что структуры Ni- n -GaAs (рис. 3, кривая 3) практически не чувствуют света в фаулеровской области спектра ($h\nu = 0,9 \dots 1,25$ эВ). Поэтому оказалось невозможным определить $q\Phi_{B0}$ для Ni- n -GaAs-структур при освещении со стороны слоя никеля по закону Фаулера. В силу этого в литературе отсутствуют данные

о высоте барьера $q\Phi_{B0}$ этих структур, полученные методом фотоответа [14, 15].

Корректность измерений фототока I_{f0} в указанной области спектра была подтверждена на структурах Au- n -GaAs (рис. 3, кривая 4), фоточувствительных в фаулеровской области спектра. Зависимость I_{f0} от $h\nu$ в последнем случае подчиняется закону Фаулера $I_{f0} \sim (h\nu - q\Phi_{B0})^2$.

Из этой зависимости определена величина $q\Phi_{B0} = 0,89$ эВ для структуры Au- n -GaAs (рис. 4). Найденное значение высоты барьера Шоттки для Au- n -GaAs при освещении со стороны Au хорошо согласуется с данными [16], полученными по методу фотоответа при освещении m - s -перехода со стороны GaAs.

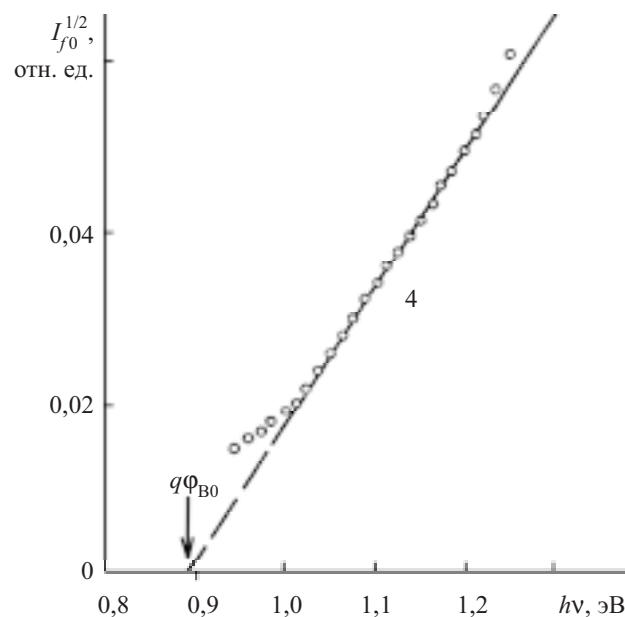


Рис. 4. Зависимость фототока ($I_{f0}^{1/2}$) от энергии фотонов ($h\nu$) для m - s -структуры Au- n -GaAs (4) при комнатной температуре

Как показали сравнительные эксперименты, отсутствие фототока в структурах Ni- n -GaAs в основном связано с тем, что при освещении со стороны полупрозрачного слоя Ni падающий свет с энергией фотонов $h\nu = 0,9 \dots 1,25$ эВ сильно отражается от зеркальной поверхности слоя никеля (рис. 3), т. е. поглощения в тонком слое никеля не происходит [17]. При данном направлении освещения традиционное объяснение фотоэффекта [14] в фаулеровской области спектра для барьерных контактов Ni- n -GaAs не может быть использовано.

Таким образом, впервые [17] экспериментально установлено, что при освещении структур Ni- n -GaAs со стороны полупрозрачного слоя Ni фотоны с энергией $h\nu = 0,9 \dots 1,25$ эВ не поглощаются в слое Ni, и эмиссии электронов из слоя Ni в GaAs не происходит, в связи с чем в структуре Ni- n -GaAs отсутствует фототок в фаулеровской области спектра. По-видимому, поэтому в известной книге С. М. Зи [15] и давно известной работе С. А. Мида [14] не приведе-

но значение $q\Phi_{B0}$ для структур Ni-n-GaAs, определенное фотоотчетом при освещении со стороны полупрозрачного слоя Ni.

Результаты данных исследований могут быть полезны при создании поверхностно-барьерных солнечных элементов на основе Ni-n-GaAs-структур, поскольку тонкие слои Ni одновременно могут выполнять функции барьерного контакта и предупреждать разогрев солнечного элемента от ближнего инфракрасного излучения Солнца с энергией фотонов $h\nu < 1,3$ эВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана.— М.: Мир, 1988.
2. Ашкинази Г. А., Жилиев Ю. В., Шульга М. И., Челноков В. Е. Силовые диоды с барьером Шоттки на арсениде галлия // Письма в ЖТФ.— 1983.— Т. 9, вып. 7.— С. 414—417.
3. Конников С. Г., Мелебаева Г. Д., Мелебаев Д. и др. Полярметрические свойства поверхностно-барьерных структур Ni-n-GaAs // Письма в ЖТФ.— 1992.— Т. 18, вып. 24.— С. 32—37.
4. Гольдберг Ю. А., Константинов О. В., Лантратов В. М. и др. Сравнение температурных зависимостей квантовой эффективности фотоэлектронпреобразования p-n-структур и диодов Шоттки на основе GaAs // ФТП.— 1999.— Т. 33, вып. 7.— С. 876—879.
5. Давыдов С. Ю., Лебедев А. А., Посредник О. В., Таиров Ю. М. Контакт металл—карбид кремния: зависимость высоты барьера Шоттки от политипа SiC // Там же.— 2001.— Т. 35, вып. 12.— С. 1437—1439.
6. Вяткин А. П., Максимова Н. К., Поплавной А. С. и др. Поверхностно-барьерные переходы в арсениде галлия и роль тамбовских состояний в их образовании // Там же.— 1970.— Т. 4, вып. 5.— С. 915—922.
7. Crowell C. R., Spitzer W. G., White H. G. Photooxidized holes running in Au // Appl Phys. Letter.— 1962.— Vol. 1.— P. 3—6.
8. Мелебаева Г. Д., Мелебаев Д., Агаев Я. и др. Спектр фоточувствительности поверхностно-барьерных структур никель—арсенид галлия, изготовленных химическим методом // Мат-лы 11-й Всесоюз. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках.— Ашхабад.— 1991.— С. 200—201.
9. Беркелиев А., Мелебаев Д. Фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур Au-n-Ga_{1-x}Al_xAs в области энергий фотонов 1—5 эВ // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН.— 1977.— Вып. 1.— С. 96—98.
10. Беркелиев А., Гольдберг Ю. А., Мелебаев Д., Царенков Б. В. Фотоприемник видимого и ультрафиолетового излучения на основе GaAs_{1-x}P_x поверхностно-барьерных структур // ФТП.— 1976.— Т. 10, вып. 8.— С. 1532—1534.
11. Беркелиев А., Гольдберг Ю. А., Именков А. Н. и др. Фотоэлектрический эффект в варизонных поверхностно-барьерных структурах // Там же.— 1978.— Т. 12, вып. 1.— С. 96—101.
12. Мелебаев Д., Мелебаева Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю. Новые возможности фотоэлектрического метода определения высоты барьера в структурах Au-n-GaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2007.— № 3.— С. 33—37.
13. Гуткин А. А., Дмитриев М. В., Наследов Д. Н., Пашковский А. В. Спектры фоточувствительности поверхностно-барьерного диода Au-n-GaAs в области энергий фотонов 1—5 эВ // ФТП.— 1971.— Т. 5, вып. 10.— С. 1927—1932.
14. Mead C. A. Metal-semiconductor surface barrier // Solid-State Electron.— 1966.— Vol. 9, N 11/12.— P. 1023—1033.
15. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Энергия, 1973.
16. Мелебаев Д., Мелебаева Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю. Определение высоты барьера Шоттки Au-n-GaAs фотоэлектрическим методом // Труды VII Междунар. науч.-практ. конф. «СИЭТ-2006». Т. II.— Одесса, Украина.— 2006.— С. 165.
17. Мелебаева Г. Д., Мелебаев Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю. Спектр фототока структуры Ni-n-GaAs // Труды VIII Междунар. науч.-практ. конф. «СИЭТ-2007».— Одесса, Украина.— 2007.— С. 346.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



3-я Международная специализированная выставка оптической, лазерной и оптоэлектронной аппаратуры
"ФОТОНИКА-2008"
 11—13 марта 2008 г.

Основные разделы выставки

- ✦ Оптика, оптические приборы и системы
- ✦ Оптоволоконное оборудование, инструменты и комплектующие
- ✦ Лазеры, лазерные системы и лазерная безопасность
- ✦ Источники света, светоизлучающие диоды, осветительная аппаратура
- ✦ Оптомеханические приборы и оборудование
- ✦ Сенсоры, детекторы, контрольно-измерительная аппаратура
- ✦ Системы нанесения, обработки и передачи изображений
- ✦ Микроскопия, спектроскопия, оптическая томография
- ✦ Аналитическая аппаратура для медико-биологических исследований
- ✦ Лазерно-оптическая медицинская техника
- ✦ Сервисные и консультационные услуги

Организаторы

ЗАО "Экспоцентр"
 Лазерная ассоциация

при поддержке и содействии

Федерального агентства по науке и инновациям, Федерального агентства по промышленности Правительства Москвы, Технологического центра Союза немецких инженеров, Европейского оптического общества, Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь

Место проведения

Москва, Выставочный комплекс
 ЗАО "Экспоцентр" на Красной Пресне
www.photonics-expo.ru