

УДК 621.315.592
EDN: YKXVHK

PACS: 81.65.Cf, 81.40.Pq.

Прецизионное полирование обратной стороны пластин Si диаметром 100 мм с изготовленными на них оптоэлектронными фоточувствительными элементами

А. А. Трофимов, Д. О. Царегородцев, А. С. Кондрахин, Н. Ю. Будтолаев,
В. А. Рафикина, С. Д. Афлитонова

Приведено исследование перспективного метода прецизионной обработки пластин монокристаллического кремния, который помогает решить проблему дефектообразования при создании контактного слоя Cr-Au ввиду недостаточно малой шероховатости поверхности.

Ключевые слова: механическое полирование, свободный абразив, кремний, фоточувствительный элемент, планарный $p-i-n$ -фотодиод.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-34-38

$P-i-n$ -фотодиоды относятся к наиболее востребованным элементам в области полупроводниковых приборов фотоэлектроники, чувствительных к излучению с длиной волны 1,06 мкм. Они предназначены для использования в электронно-оптических системах, которые используются для регистрации коротких (от 10 до 40 нс) импульсов лазерного излучения: высокоточные системы наведения, лазерные дальнометры, регистраторы лазерного излучения в системах защиты и другие [1]. Структура такого фоточувствительного элемента представлена на рисунке 1 [2].

Технология производства носит сложный многоступенчатый характер [3], и включает такие операции как термическое окисление, диффузия фосфора для формирования областей n^+ -типа проводимости, разгонка фосфора с одновременным окислением для выращивания защитной пленки двуокиси кремния, диффузия фосфора в обратную поверхность подложки для геттерирования загрязняющих примесей, удаление геттерирующего слоя при помощи химико-динамического полирования (ХДП), диффузия бора в обратную поверхность подложки для формирования контактного слоя p^{++} -типа проводимости, операция химического травления пленки двуокиси кремния для получения просветляющего покрытия и операция создания двухслойных омических контактов к фоточувствительным площадкам, охранному кольцу и слою p^{++} -типа проводимости на обратной стороне пластины методом напыления пленки золота с подслоем хрома, причем толщина пленки хрома на тыльном слое составляет 5–6 нм. Из-за резкого уменьшения коэффициентов диффузии примесей с понижением температуры процессов (экспоненциальная зависимость от температуры) в объем кремния проникают в основном примеси с высокими коэффициентами диффузии, которые затем эффективно удаляются с помощью процессов

Трофимов Александр Александрович^{1,2}, зам. нач. производства.

Царегородцев Денис Олегович¹, вед. инженер.

Кондрахин Александр Сергеевич¹, инженер.

E-mail: konsa01@gmail.com

Будтолаев Николай Юрьевич¹, инженер 2 кат.

Рафикина Василиса Андреевна¹, сборщик изделий.

Афлитонова Светлана Дамировна², студентка.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

² МИРЭА – Российский технологический университет.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 10.07.2024

После доработки 26.07.2024

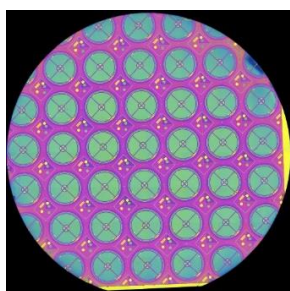
Принята к публикации 30.07.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

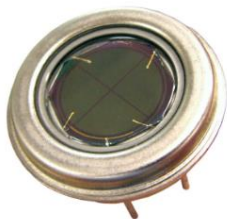
© Трофимов А. А., Царегородцев Д. О., Кондрахин А. С., Будтолаев Н. Ю., Рафикина В. А., Афлитонова С. Д., 2024

геттерирования. Благодаря этому снижается концентрация генерационно-рекомбинационных центров в *i*-области фотодиода, что при-

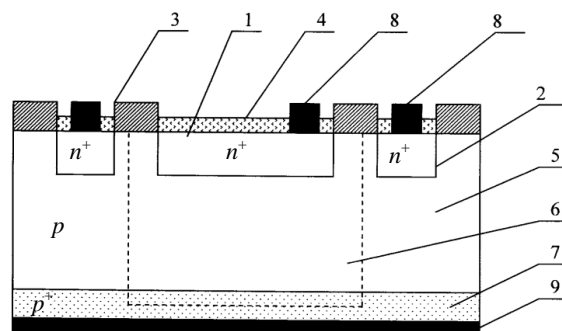
водит к снижению темнового тока фотодиода (не менее, чем на порядок) и увеличению процента выхода годных приборов [4].



а)



б)



в)

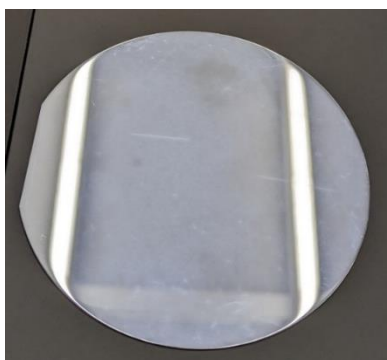
Рис. 1. Кремниевый планарный *p-i-n*-фотодиод: а) – 100 мм пластина Si с изготовленными на ней приборами; б) – типичный вид; в) – структурная схема, где 1 – фоточувствительная площадка *n*⁺-типа проводимости; 2 – охранное кольцо *n*⁺-типа проводимости; 3, 4 – защитная и просветляющая пленки двуокиси кремния; 5 – база ФЧЭ; 6 – ОПЗ; 7 – контактный слой *p*⁺-типа проводимости; 8, 9 – контактная система Cr-Au к *n*⁺- и *p*⁺-областям

Ввиду столь малой толщины контактного слоя Cr-Au, к обратной стороне пластины предъявляются строгие требования по шероховатости поверхности. В ходе производства на этапе создания контактов были выявлены случаи недостаточной адгезии слоя Cr-Au к поверхности пластины (рис. 2в), с последующей отбраковкой изделий.

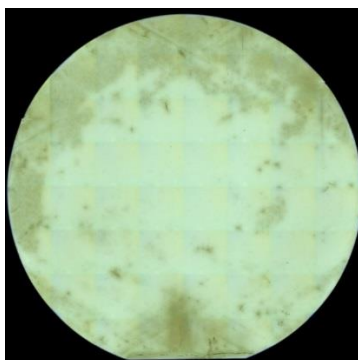
По стандартной технологии производства перед нанесением контактной системы Cr-Au производится ХДП пластины в травителе HNO₃:HF:CH₃COOH для удаления геттеризирующего слоя и последующая диффузия

бора в обратную поверхность подложки для формирования контактного слоя *p*⁺⁺-типа проводимости глубиной около 1 мкм.

Особенность заключается в том, что нанесение контактной системы Cr-Au на обратную сторону пластины является одним из заключительных этапов технологии изготовления кремниевых планарных *p-i-n*-фотодиодов, и, таким образом, дефекты поверхности при формировании контактной системы Cr-Au существенно снижают выход годных уже сформированных фоточувствительных элементов.



а)



б)



в)

Рис. 2. Выявленные дефекты: а) – внешний вид обратной стороны 100 мм пластины Si; б) – обратная сторона 100 мм пластины Si под микроскопом; в) – вид дефектов поверхности контактной системы Cr-Au на обратной стороне пластины Si

Для того, чтобы увеличить процент выхода годных приборов, предложено после диффузии бора в обратную поверхность подложки для формирования контактного слоя p^{++} -типа проводимости глубиной около 1 мкм

введение дополнительной операции механического полирования свободным абразивом, которое способно уменьшить исходную шероховатость поверхности (рис. 3) обратной стороны пластин [5, 6].

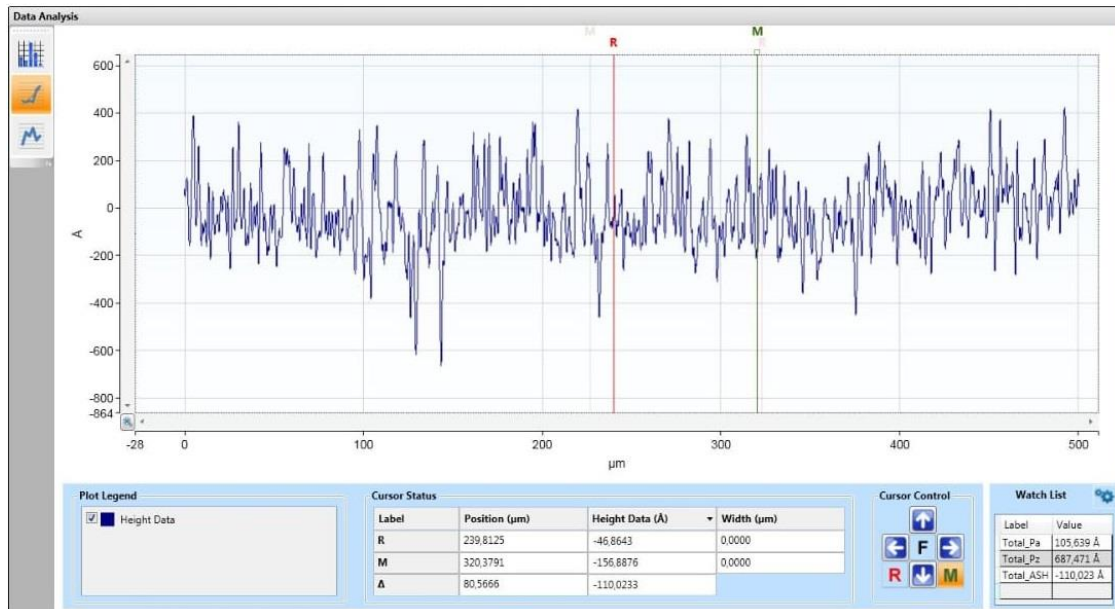


Рис. 3. Результаты измерения шероховатости поверхности обратной стороны 100 мм пластины Si перед полированием при помощи контактного профилометра DektakXT: $R_a = 10,5$ нм на длине 80 мкм

Особенность механической обработки кремния заключается в его высокой твердости и хрупкости. Также, толщина слоя p^{++} на обратной стороне пластины, на который после ХДП и диффузии бора наносится контактная система Cr-Au составляет ≤ 1 мкм. При его уменьшении снижаются параметры сопротивления поверхности обратной стороны пластины, что затрудняет получение качественного омического контакта к обратной стороне пластины и, как следствие, может привести к отбраковке готовых фоточувствительных элементов. Поэтому получение требуемой минимальной шероховатости поверхности сопряжено с необходимостью съема минимальной толщины материала (менее 0,3 мкм).

Обработка обратной стороны 100 мм пластин Si с изготовленными на них оптоэлектронными фоточувствительными элементами производилась на установке Logitech PM5 с использованием суспензии на основе Al_2O_3 с размером абразивных частиц 0,05 мкм. Полировальное полотно выбиралось, исходя из размеров и физических свойств обрабатываемых пластин. Также при обработке пластин с увеличением их диаметра возрастают требования к подготовке оснастки, тщатель-

ном обеспечении ее геометрических параметров, влияющих на получение качественного результата в ходе обработки. При условии необходимости снижения шероховатости поверхности на порядок в совокупности с крайне малой величиной допустимого съема материала (около 0,1 мкм) проблема обеспечения однородности обработки по всей площади 100 мм пластины, а также стабильности и воспроизводимости результата приобретает важное значение. Внешний вид поверхности обратной стороны 100 мм пластины Si и результаты измерений шероховатости поверхности после механического полирования представлены на рисунке 4.

После обработки при помощи прибора Jandel rm3000 измерялось сопротивление p^{++} -слоя обратной стороны пластины, которое после механического полирования составило 32–40 Ом/кв. Данный результат соответствует норме и в сравнении со значением после диффузии бора в 28–30 Ом/кв свидетельствует о минимальном снятии p^{++} -слоя в ходе механического полирования. Пороговым значением сопротивления поверхности, после которого происходит отбраковка пластины, является величина > 50 Ом/кв.

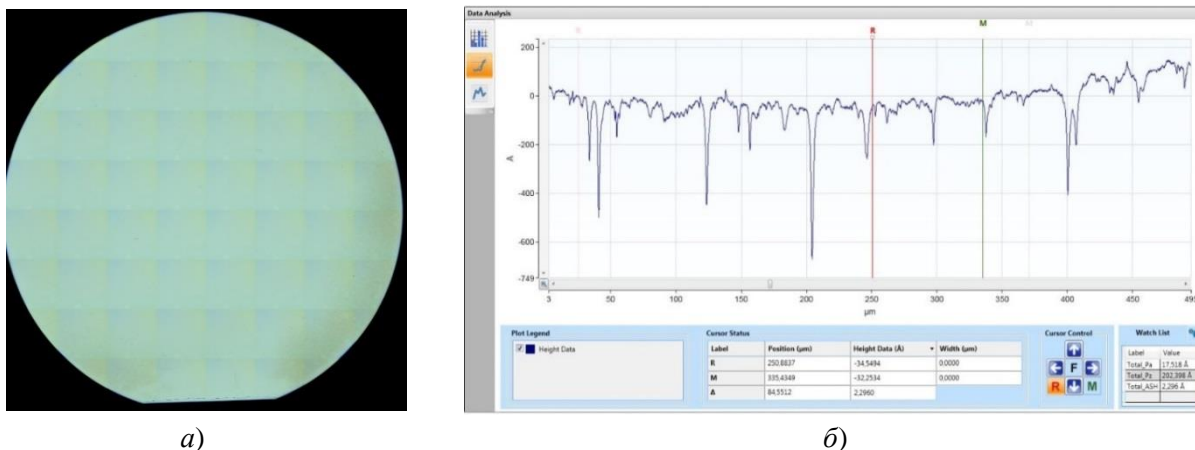


Рис. 4. Обратная сторона 100 мм пластины Si после механического прецизионного полирования: а) – внешний вид под микроскопом; б) – результат измерения шероховатости поверхности при помощи контактного профилометра DektakXT: Ra = 1,5 нм на длине 84 мкм

Снижение шероховатости поверхности обратной стороны 100 мм пластины Si после операции прецизионного механического по-

лирования дополнительно подтверждено измерением на оптическом профилометре Sensofar S Neox (рис. 5).

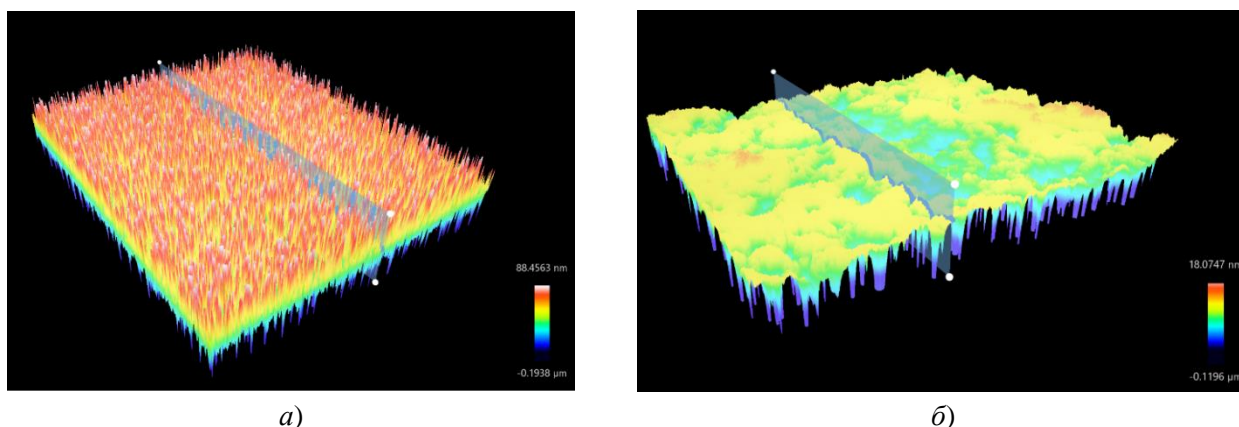


Рис. 5. Морфология и шероховатость поверхности обратной стороны 100 мм пластины Si: а) – до обработки Ra = 9,9 нм; б) – после операции механического полирования Ra = 1,2 нм

Обработанные пластины далее переданы для проведения операции магнетронного нанесения контактного слоя Cr-Au. В результате на всех обработанных образцах наблюдается качественная адгезия контактного слоя, и отсутствие визуальных дефектов.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана лабораторная операция прецизионного полирования обратной стороны 100 мм пластин Si с изготовленными на них оптоэлектронными фоточувствительными элементами, которая позволяет в ходе обработки при минимальном снятии материала (0,1–0,2 мкм) устойчиво получать снижение шероховатости поверхности от исходной Ra = 10 нм до заданной Ra = 1,2 нм,

при этом обеспечивая визуальную зеркальность поверхности, отсутствие видимых дефектов и сохранение геометрических характеристик плоскопараллельности пластины, что имеет важное значение на последующей технологической операции магнетронного нанесения контактной системы металлов. Данная операция успешно внедрена в серийное производство кремниевых p-i-n-фотодиодов в АО «НПО «Орион». Обработано более 150 пластин с выходом годных 99 % и полной воспроизводимостью результата. Применение этой дополнительной операции после формирования слоя p⁺⁺-типа проводимости позволяет существенно снизить вероятность возникновения дефектов при магнетронном

напылении контактной системы Cr-Au на обратную сторону пластины, тем самым увеличивая выход годных сформированных приборов и практически исключая отбраковку 100 мм пластины Si на заключительных этапах изготовления кремниевых планарных $p-i-n$ -фотодиодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будтолаев А. К., Либерова Г. В., Хижняк В. И. / Прикладная физика. 2018. № 5. С. 47–49.
2. Будтолаев А. К., Либерова Г. В., Рыбаков А. В., Хакуашев П. Е. Способ изготовления многоплощадоч-

ного кремниевого $p-i-n$ -фоточувствительного элемента. Патент РФ RU2654998C1. 2018 г. Бюл. № 15.

3. Демидов С. С., Климанов Е. А. Способ изготовления кремниевого фотодиода. Патент РФ RU2654992C1. 2018. Бюл. № 15.

4. Болесов И. А. Исследования и разработка технологии изготовления PIN-фотодиодов на основе кремния с применением ионной имплантации: дисс. канд. техн. наук. – М., 2004.

5. Трофимов А. А., Денисов И. А., Смирнова Н. А. и др. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 3. С. 289–300.

6. Трофимов А. А., Ухабин О. А., Смирнов А. С., Курепин С. А., Денисов И. А. и др. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 5. С. 459–468.

PACS: 81.65.Cf, 81.40.Pq.

Precision polishing the back side of 100 mm wafers Si with optoelectronic photosensitive elements

A. A. Trofimov^{1,2}, D. O. Tsaregorodtsev¹, A. S. Kondrakhin¹, N. Y. Budtolaev¹,
V. A. Rafikova¹ and S. D. Afritonova²

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., 119454, Russia

Received 10.07.2024; revised 26.07.2024; accepted 30.07.2024

The work is devoted to the development of technology for manufacturing photodiodes based on silicon, which remains one of the most widely used materials in the microelectronics industry. A study is presented of a promising method for precision processing of monocrystalline silicon wafers, which helps solve the problem of defect formation when creating a Cr-Au contact layer due to the insufficiently low surface roughness.

Keywords: mechanical polishing, loose abrasive, silicon, photosensitive element, planar, $p-i-n$ photodiode.

REFERENCES

1. Budtolaev A. K., Liberova G. V. and Hijnyak V. I., Applied Physics, № 5, 47 (2018) [in Russian].
2. Budtolaev A. K., Liberova G. V., Rybakov A. V. and Hakuashev P. E. Patent RU 2654998C1, 23.05.2018, № 15.
3. Demidov S. S. and Klimanov E. A. Patent RU 2654992C1, 23.05.2018, № 15.
4. Bolesov I. A. Diss. Issledovaniya i razrabotka tekhnologii izgotovleniya PIN-fotodiodov na osnove kremniya s primeneniem ionnoi implantatsii: kand. tech. nauk. M., 2004.
5. Trofimov A. A., Denisov I. A. and Smirnova N. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **10** (3), 289 (2022) [in Russian].
6. Trofimov A. A., Uchabin O. A., Smirnov A. S., Kurepin S. A. and Denisov I. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **10** (5), 459 (2022) [in Russian].