

УДК 621.383.4/5:621.315.59

PACS: 07.07 Df, 07.57.-c,  
81.05.Ea, 81.65.Rv

## Многослойные интерференционные покрытия на основе слоёв кремния и двуокиси кремния на утоньшенных матричных фотоприемниках из InSb с повышенной механической прочностью и воспроизводимостью

А. А. Лопухин, К. О. Болтарь, А. Н. Гришина, С. Е. Шишигин

*Рассмотрены способы повышения механической прочности и воспроизводимости в конструкции двухспектральных утоньшенных матричных фотоприемников из InSb посредством напыления многослойных интерференционных покрытий на основе слоёв кремния и двуокиси кремния. Представлены результаты моделирования распределения механических напряжений и подавления погрешностей оптической толщины антиотражающих покрытий с различным количеством слоев. Получены экспериментальные образцы двухспектральных матричных фотоприемников, подтверждающие результаты моделирования.*

**Ключевые слова:** матричный фотоприемник (МФП), матричный фоточувствительный элемент (МФЧЭ), антимонид индия, кремний, двуокись кремния, многослойные интерференционные покрытия, прочность, воспроизводимость, моделирование.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2022-10-1-14-22

### Введение

Современные матричные фотоприемники ИК-диапазона характеризуются использованием многоспектральности [1–3], предназначенной для распознавания и идентификации объектов.

В АО «НПО «Орион» ведется разработка двухспектральных матричных фотоприем-

ников [4–6]. Конструкция фотоприемного модуля с фильтром, монтируемым над МФЧЭ, в котором фильтр изготавливался на кремниевой пластине, прозрачной в требуемой области спектра, напылением полосового и двух отрезающих фильтров, обеспечивающих необходимое пропускание, и охлаждается через индиевые контакты, соединяющие его с БИС считывания.

В используемой гибридной конструкции МФП существует проблема хрупкости утоньшенных МФЧЭ полупроводниковых структур. Такие структуры могут легко раскалываться под действием механических напряжений при охлаждении до криогенных температур вследствие напряжений, возникающих из-за разности коэффициентов линейного теплового расширения (ТКР) между кремниевой БИС считывания и ФЧ полупроводниковой пластинкой. Обычно разрушение начинается в точке, где существует дефект и локальное напряжение превышает некоторое критическое значение. Действительно, если к тонкой ФЧ структуре приложить изгибающее усилие и не трогать образец, то в течение значительного времени он может оставаться в напря-

Лопухин Алексей Алексеевич<sup>1</sup>, нач. участка, к.т.н.  
Болтарь Константин Олегович<sup>1,2</sup>, начальник НТК,  
профессор, д.ф.-м.н.

Гришина Анна Николаевна<sup>1</sup>, инженер 1 кат.  
Шишигин Сергей Евгеньевич<sup>1</sup>, инженер-испытатель  
2 кат.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».  
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет).  
Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,  
Институтский пер., 9.

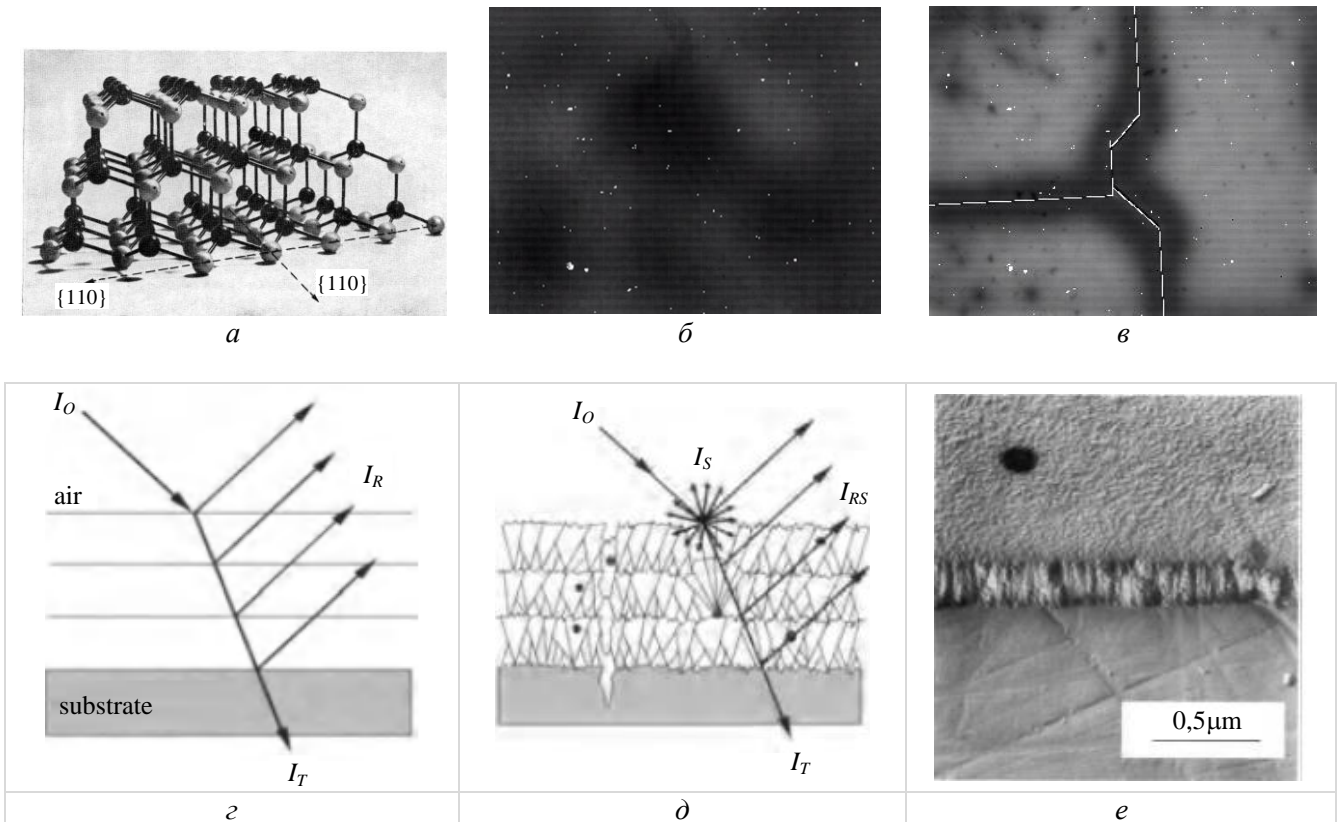
Статья поступила в редакцию 25 января 2022 г.

© Лопухин А. А., Болтарь К. О., Гришина А. Н.,  
Шишигин С. Е., 2022

женном состоянии. Однако, если каким-либо заостренным предметом слегка коснуться поверхности, находящейся в напряженном состоянии растяжения, то в этом месте может произойти спонтанное скалывание [7].

Идеальная прочность кристаллических твердых тел определяется разрушением их по определенным кристаллографическим плоскостям. Установлено, что в кристаллах со

структурой цинковой обманки скалывание легче всего происходит вдоль плоскостей  $\{110\}$ , тогда как в кристаллах со структурой алмаза – вдоль плоскостей  $\{111\}$ . В антимониде индия, кроме скалывания по плоскостям  $(110)$ , обнаружено достаточно заметное скалывание по плоскостям  $(111)$ , означающее, что в этих соединениях степень ионной связи мала (рис. 1 а–в).



**Рис. 1.** Кристаллическая структура  $\text{InSb}$  с атомарными связями в направлениях  $\{111\}$  с соседними разноименными атомами и в направлениях  $\{110\}$  с ближайшими одноименными атомами [8] (а) и изображения дефектов на МФП из антимонида индия толщиной  $\approx 500$  мкм (б) и трещин, возникших после утоньшения его до толщины  $\approx 10$  мкм (в). Микроструктура напыляемых пленок [10]: модель (г), реальная структура (д), микрофотография (е)

Результаты моделирования в САПР Optilayer показали, что фильтры, предназначенные для распознавания наблюдаемых объектов, должны состоять из десятков слоёв общей толщиной, составляющей от 1 до 10 и более микрометров [1, 2]. Учитывая тот факт, что такие покрытия формируются длительное время (доходящее до нескольких суток), а также большие технологические сложности утоньшения МФЧЭ, в частности, для  $\text{InSb}$  требуется утоньшение до уровня 10 мкм, неизбежно возникают требования к воспроизводимости процесса формирования много-

слойных интерференционных покрытий, приближающиеся к 100 %.

Одной из наиболее фундаментальных причин, приводящих к невоспроизводимости многослойных интерференционных покрытий является пористость или неплотность напыляемого материала, в котором пустоты, чаще всего представляющие собой столбчатую структуру, как правило, частично заполняются водой (см. рис. 1 е).

Кроме этого, поры увеличивают шероховатость поверхности, таким образом влияя не только на показатель преломления  $n$ , но и на

толщину  $d$  покрытия. Пористость зависит от многочисленных технологических факторов (метода формирования пленки, температуры подложки, давления в камере, скорости напыления и т. д.), приводя к невоспроизводимости спектров многослойных интерференционных покрытий [9].

### Повышение механической прочности утонченных МФП из InSb

Построим математическую модель векторной дискретизации сдвиговых напряжений. Рассмотрим структуру, состоящую из пластин Si и InSb, которые соединены двумя индиевыми микроконтактами и охлажденную до температуры жидкого азота (рис. 2 а). В этом

случае возникают механические напряжения, связанные с разными ТКР материалов InSb и Si. Проведем расчёт напряжения на любом In микроконтакте в матричном фотоприемнике путём векторного суммирования напряжений от всех остальных индиевых микроконтактов. Результаты расчета модуля нормированного напряжения на центр матричного фотоприемника в виде 3d изображения приведены на рис. 2 в. Заметим, что напряжения имеют центрально-симметричный характер распределения и уменьшаются по мере приближения к центру. Ниже приведен график изменения ТКР в зависимости от температуры у таких материалов, как InSb, Si, SiO<sub>2</sub>, которые были использованы при моделировании (рис. 2 г).

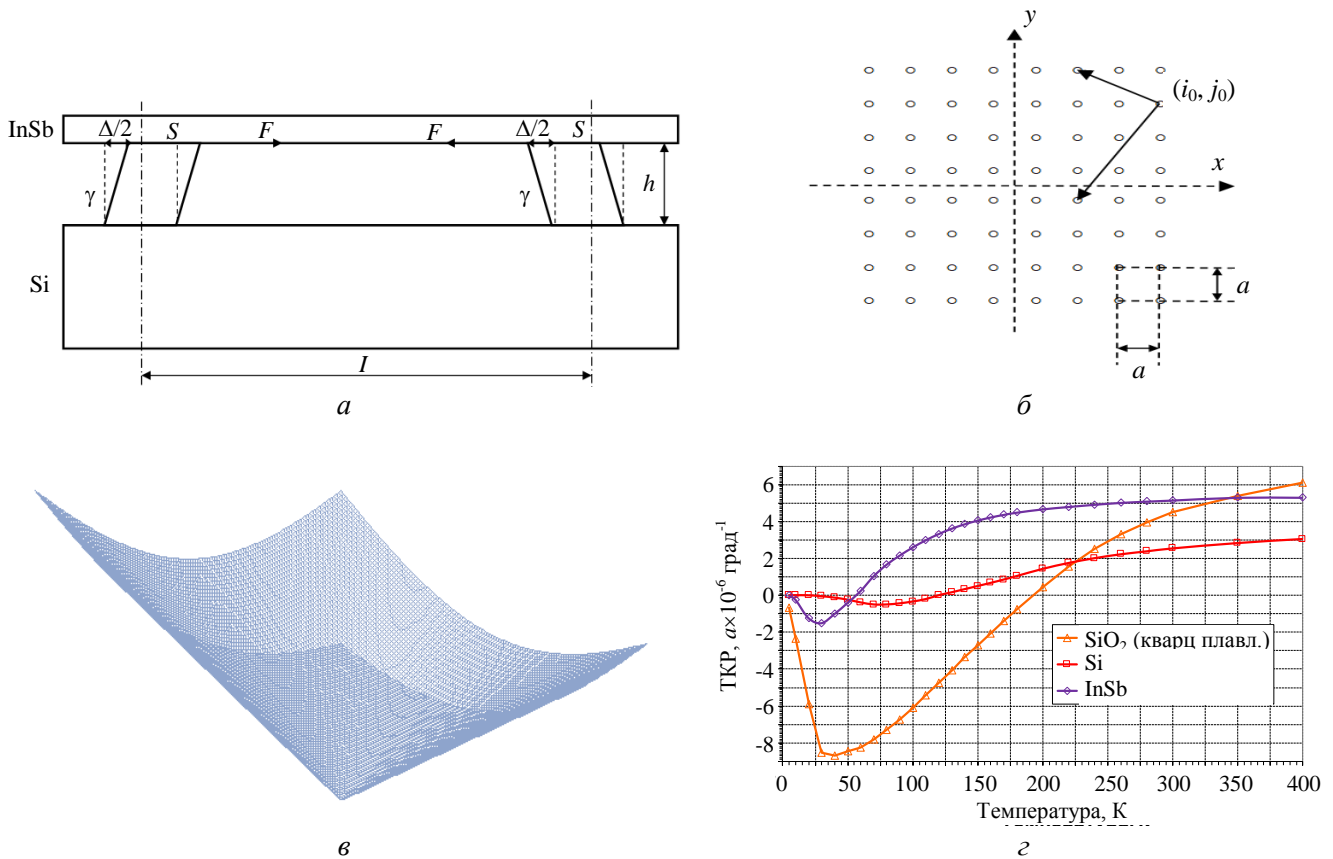


Рис. 2. Структурная схема возникновения механических напряжений в случае двух In микроконтактов между пластинами InSb и Si при охлаждении до криогенной температуры (а) и векторное распределение сдвиговых напряжений одного индиевого микроконтакта (б). Результаты расчёта векторного распределения сдвиговых напряжений индиевых микроконтактов, нормированных на центр матричного фотоприемника (в). Отличия ТКР материалов Si, InSb, SiO<sub>2</sub> (кварц плавленый) в зависимости от температуры (г)

Рассмотрим структуру, изображённую на рис. 2 а. Она состоит из пластин Si и InSb, которые соединены двумя индиевыми микро-

контактами и охлаждена до температуры жидкого азота. В этом случае возникают механические напряжения, связанные с разными ТКР

пластин Si и InSb. Для описания этого процесса применим два закона:

1. Закон Р. Гука. В этом случае механическое напряжение на микроконтакте равно

$$\tau = F / S = G \times \gamma = G \times \arctg\left(\frac{\Delta l}{2h}\right) \approx G \frac{\Delta l}{2h}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига н/м<sup>2</sup>;  $G$  – модуль сдвига Па;  $\gamma$  – угол сдвига.

2. Исходя из определения температурного коэффициента линейного расширения имеем

$$\frac{\Delta l}{l} = \Delta\alpha \times \Delta T, \quad (2)$$

где  $\Delta\alpha$  – изменение ТКР 1/К;  $\Delta T$  – изменение температуры К.

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{i_0 j_0} &= \sum_{ij} G \frac{\Delta\alpha\Delta T}{2h} \times \bar{l}_{ij} = G \frac{\Delta\alpha\Delta T a}{2h} \sum_{ij} \{(j - j_0)\bar{e}_x + (i - i_0)\bar{e}_y\} = \\ &= G \frac{\Delta\alpha\Delta T a}{2h} \left\{ n \left[ \frac{m(m+1)}{2} - m j_0 \right] \bar{e}_x + m \left[ \frac{n(n+1)}{2} - n i_0 \right] \bar{e}_y \right\} = \\ &= G \frac{\Delta\alpha\Delta T a \times nm}{4h} \{(m+1-2j_0)\bar{e}_x + (n+1-2i_0)\bar{e}_y\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Итак,

$$\begin{aligned} |\bar{\tau}_{i_0 j_0}| &= G \frac{\Delta\alpha\Delta T a \times nm}{4h} \times \\ &\times \left\{ \sqrt{(m+1-2j_0)^2 + (n+1-2i_0)^2} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

или нормированное напряжение на центр матрицы

$$\frac{|\bar{\tau}_{i_0 j_0}|}{\left| \bar{\tau}_{\frac{n}{2} \frac{m}{2}} \right|} = \sqrt{\frac{(m+1-2j_0)^2 + (n+1-2i_0)^2}{2}}, \quad (7)$$

где  $i_0 = 1...n, j_0 = 1...m$ .

Минимум при  $j_0 = m/2, m/2+1$  и  $i_0 = n/2, n/2+1$  равен

$$\tau/\tau_0 = 1. \quad (8)$$

Максимум при  $j_0 = 1, m$  и  $i_0 = 1, n$  равен

$$\tau/\tau_0 = \sqrt{\frac{(m-1)^2 + (n-1)^2}{2}} = n-1 (m=n). \quad (9)$$

Вышеприведенные расчёты не учитывает вязко-пластичную релаксацию In микрокон-

Подставляя изменение длины  $\Delta l$  из (1) в (2) получаем напряжение для двух микроконтактов:

$$\bar{\tau}_2 = G \times \frac{\Delta\alpha\Delta T}{2h} \times \bar{l}_2. \quad (3)$$

Рассчитаем напряжение на микроконтакте ( $i_0 = 1...n, j_0 = 1...m$ ) в матрице путем суммирования напряжений от всех остальных индиевых микроконтактов. Для матрицы формата  $m \times n$

$$\bar{l}_{ij} = a(j - j_0)\bar{e}_x + a(i - i_0)\bar{e}_y, \quad (4)$$

где  $a$  – шаг между микроконтактами (рис. 2 б).

Тогда напряжение на микроконтакте ( $i_0, j_0$ ) будет равно:

тактов при термоциклировании и перераспределение напряжений в утоньшённом МФП с многослойным интерференционным покрытием. Поэтому для приближения к реальной модели необходимо построить 3d модель гибридной структуры, охлаждённой до 77 К. При этом, каждой структуре был задан материал и физический процесс. В нашем случае – это температурное расширение.

Вначале рассмотрим релаксацию индиевых микроконтактов при криогенных температурах. Видно, что релаксация происходит не полностью и механические напряжения всё равно остаются в структуре (рис. 3, а-е).

При моделировании однослойного покрытия на МФЧЭ предполагалось, что кремний будет растягивать её при охлаждении, так как его ТКР схож с кремниевой БИС, и уменьшать напряжения с краёв и внутренней стороны матрицы. Как видно на изображении (рис. 3, б), предположения подтвердились. Двоокись кремния при воздействии механических напряжений загибает края матрицы вверх, образуя «крылья» (рис. 3, в), что может привести к отрывам по краям. Это происходит

благодаря сильно отличающимся ТКР  $\text{SiO}_2$  от антимида индия. Следующим видом моделирования стало нанесение двухслойного покрытия  $\text{Si} + \text{SiO}_2$  (рис. 3, з) и  $\text{SiO}_2 + \text{Si}$  (рис. 3, д). Результат нанесения первым слоем кремния приводит к образованию крыльев и соответственно к отрывам по краям, но, если наносить кремний вторым слоем, этого не происходит, так как кремний, как говорилось ранее, растягивает поверхность при охлаждении, тем самым компенсируя напряжения на нижних слоях.

На рис. 3, е показано моделирование мезоструктуры на возникновение напряжений по площади МФП при криогенных температурах. Результат показал, что в углах рельефных областей возникают механические напряжения, и это может привести к трещинообразованию. Тем самым, перераспределение напряжений с матрицы фоточувствительных элементов со стороны мезы на тыльную сторону становится наиболее важным.

3-х мерное моделирование структуры матричного фотоприемника показало, что нанесение 30-слойного полосового фильтра, формирующего окно прозрачности атмосферы

и содержащего слой кремния и двуокиси кремния, на тыльную сторону МФП позволило перераспределить напряжения с лицевой стороны на тыльную (рис. 4, а–в) и в область внешних слоёв фильтра, тем самым повысив механическую прочность (рис. 4, з).

Таким образом, исходя из того, что наиболее важным для обеспечения механической прочности является наличие механических напряжений, возникающих при охлаждении, предлагается перераспределить напряжения с лицевой стороны, где расположены  $p-n$ -переходы из антимида индия, а также мезоструктура с концентрацией напряжений в углах, на тыльную сторону, со стороны падающего ИК-излучения, которая утоньшена наименее бездефектной химико-динамической полировкой и просветлена интерференционным покрытием. Для этого предлагается сформировать фильтр с тыльной стороны, одним из компонентов которого является кремний, совпадающий с материалом БИС считывания, который, растягивая антимида индия, уменьшает напряжения, возникающие на In микроконтактах при охлаждении.

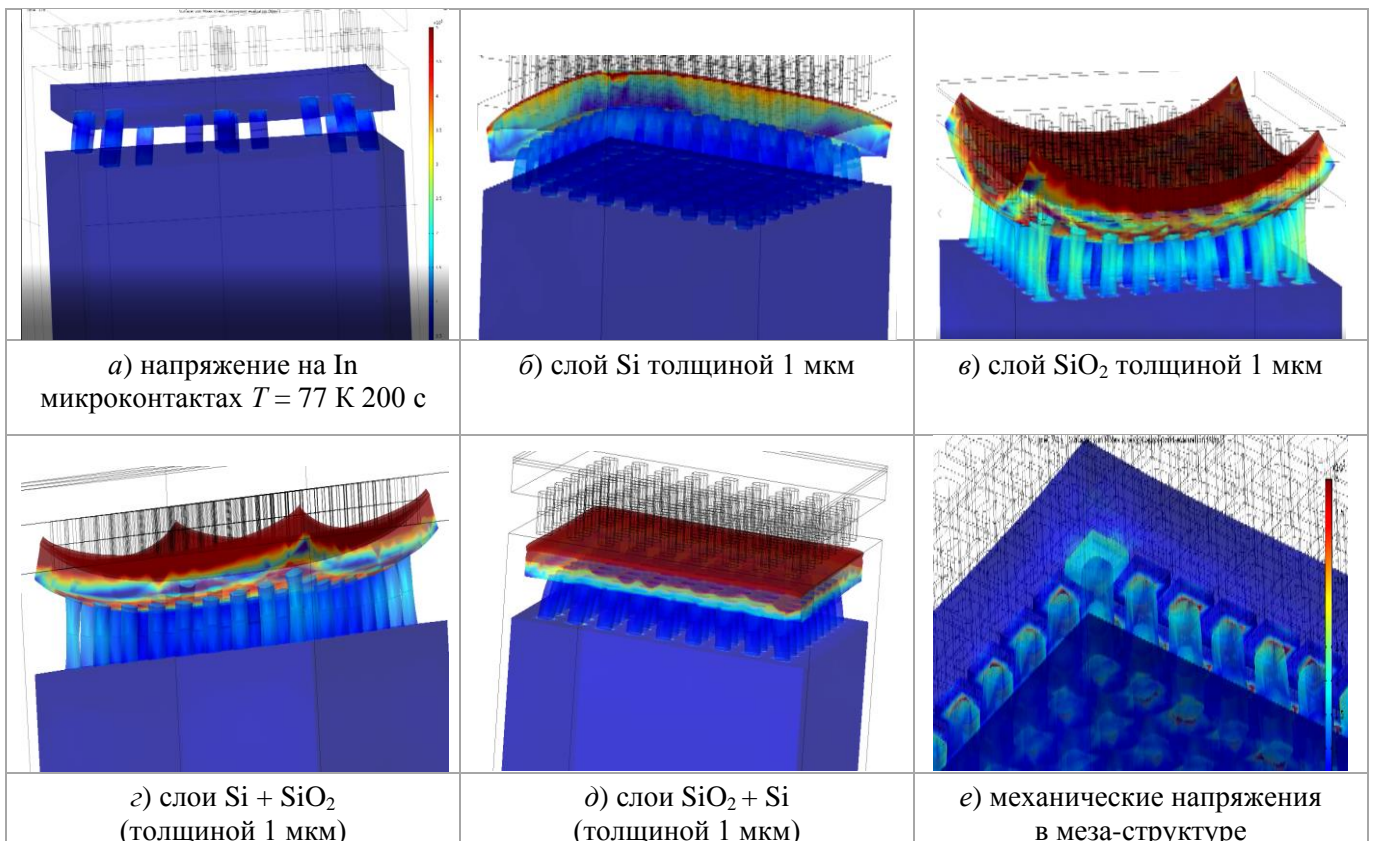


Рис. 3. Моделирование конструкции  $\text{InSb-In}$  микроконтакты – Si

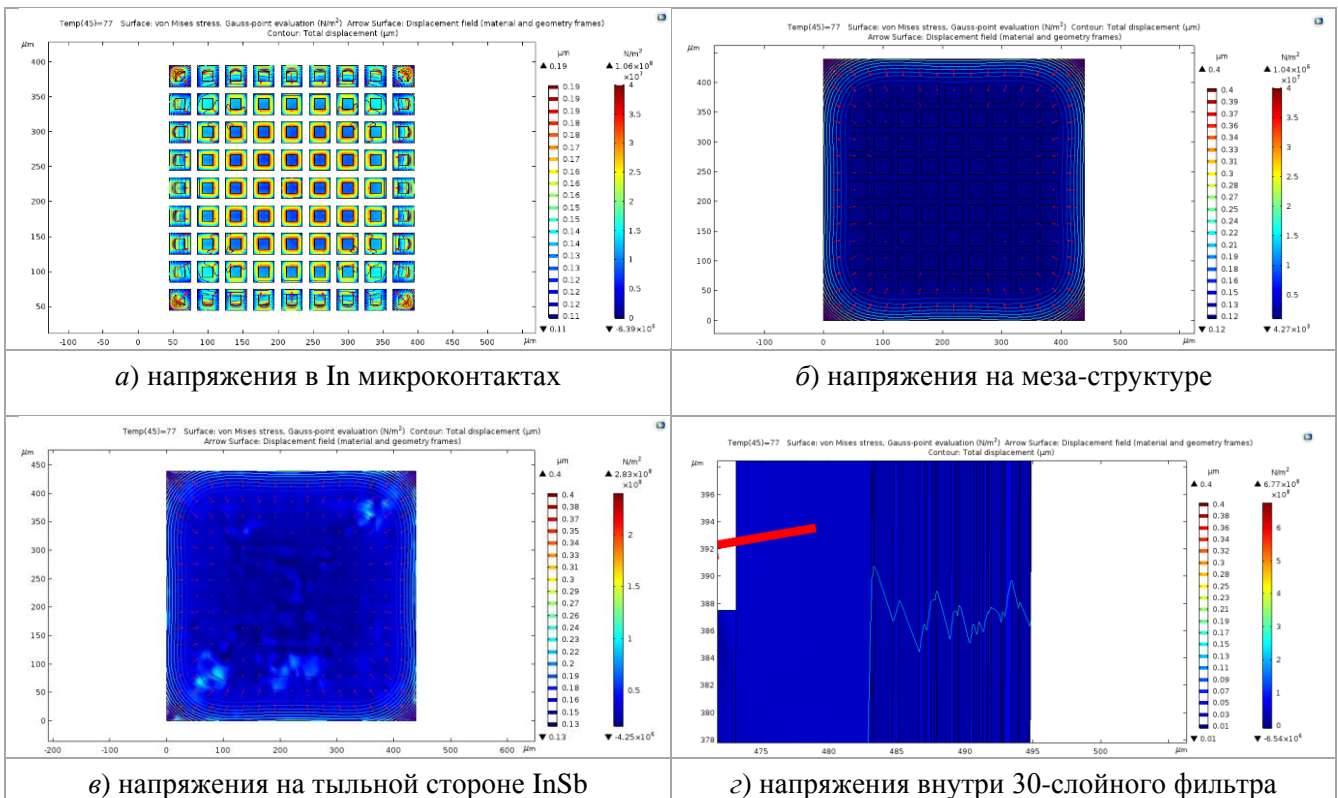


Рис. 4. Моделирование меза-структуры на возникновение напряжений при криогенных температурах 30-слойного фильтра

### Повышение воспроизводимости изготовления просветляющего покрытия

В напылительной установке, используемой для формирования многослойных покрытий на основе слоёв Si–SiO<sub>2</sub> имеется возможность записи параметров процесса напыления в реальном времени. При тщательном соблюдении идентичности условий проведения шести процессов напыления однослойных покрытий Si и SiO<sub>2</sub> была обнаружена линейная зависимость напыляемой толщины покрытия методом ЭЛИ (электронно-лучевого испарения) от величины навески материала в тигле при одинаковом времени открытия заслонки при напылении (см. рис. 5, а). С учетом этих зависимостей отклонение толщины слоя относительно заданной 3500 Å составило 0,77 % для Si и 1,9 % для SiO<sub>2</sub>.

Однако погрешность толщины может резко возрасти в случае напыления многослойного покрытия Si–SiO<sub>2</sub> на один кварцевый датчик.

Спонтанные флуктуации некоторых датчиков толщины при воздействии напряжений через осаждение «жестких» материалов на резонатор могут приводить к периодическому

возникновению неустойчивости резонатора (резкое изменение частоты, не связанное с изменением толщины осаждаемого покрытия), что приводит к погрешностям измерения толщины на десятки процентов [11]. В связи с этим, предлагается использовать эффект подавления погрешностей оптической толщины слоёв за счет некоррелированности случайных и систематических ошибок толщин слоёв и уникальной комбинации толщин предложенного многослойного покрытия для анализа которого введем коэффициент подавления погрешности толщины, представляющий собой отношение нормированного среднеквадратичного отклонения (СКО) толщины к коэффициенту отражения R<sub>АОП</sub>.

Коэффициент подавления погрешности толщины:

$$КППТ(\lambda, t) = \frac{СКО(t)}{R_{АОП}(\lambda)},$$

где СКО(t) – нормированное среднеквадратичное отклонение толщины АОП; R<sub>АОП</sub>(λ) – коэффициент отражения антиотражающего покрытия (АОП); t – толщина слоёв Si–SiO<sub>2</sub>; λ – длина волны падающего излучения.

Как показало моделирование (рис. 5, в, з), близкое к оптимальному семислойное антиотражающее покрытие на основе чередующихся слоёв Si–SiO<sub>2</sub> позволяет подавить значительные погрешности оптической толщины слоёв вплоть до 10÷15 раз за счет некоррелированности случайных и систематических ошибок толщин слоёв и уникальной комбина-

ции толщин предложенного многослойного покрытия.

Эти результаты моделирования подтверждены тремя экспериментальными процессами формирования семислойного антиотражающего покрытия, в которых отражение значительно меньше стандартного отклонения толщин напылённых слоёв Si–SiO<sub>2</sub> (см. рис. 5, б).

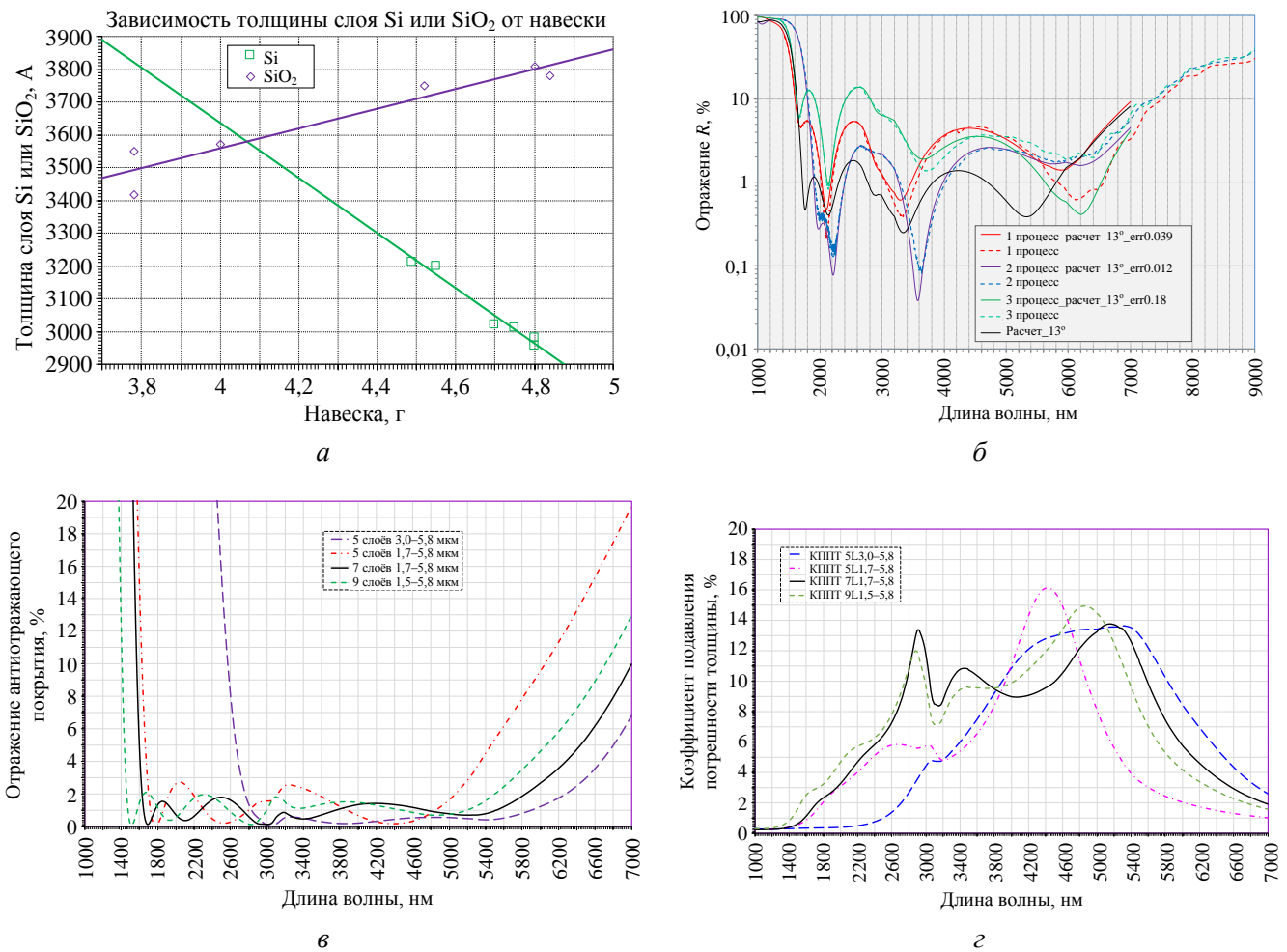


Рис. 5. Зависимости толщины слоя Si, SiO<sub>2</sub> от навески (а). Сравнение экспериментальных спектров отражения SiO<sub>2</sub> 0,80–Si 0,96 (7 layers on InSb) и расчётного спектра отражения при стандартном отклонении толщины слоёв – 1(35,4 %), 2(8,4 %), 3(25,7 %) процесс (б). Расчётное отражение (в) и коэффициент подавления погрешности толщины при CKO = 20 % (з) антиотражающих покрытий с различным количеством слоёв Si–SiO<sub>2</sub>

### Выводы

Изготовленные опытные образцы двух-спектральных матричных фотоприёмников на основе InSb с предложенной конструкцией семислойного антиотражающего покрытия на основе чередующихся слоёв Si–SiO<sub>2</sub> выдержали испытание на термодикличность от комнатной температуры до температуры жидкого

азота и показали фотоэлектрические характеристики близкие к предельным.

Трёхмерное моделирование структуры матричного фотоприемника показало, что нанесение фильтра, содержащего слои кремния и двуокиси кремния, на тыльную сторону МФП позволило перераспределить напряжения с лицевой стороны на тыльную и тем самым повысить механическую прочность.

С другой стороны, близкое к оптимальному семислойное антиотражающее покрытие на основе чередующихся слоёв Si–SiO<sub>2</sub>, позволило подавить значительные погрешности оптической толщины слоёв вплоть до 10÷15 раз за счет некоррелированности случайных и систематических ошибок толщин слоёв и уникальной комбинации толщин предложенного многослойного покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Höglund Linda, von Würtemberg Rickard Marcks, Gatty Hithesh, Gamfeldt Anders, Asplund Carl, Costard Eric // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10111. P. 1011116.
2. Sik Herve, Fleury Joel, Laprat Patrice. Bispectral matrix sensor and method for manufacturing the same. Patent US20170125614A1.
3. Delaunay Pierre-Yves, Noshu Brett Z., Gurga Alexander R., Terterian Sevag, Rajavel Rajesh D. // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10177. P. 101770T-1.

4. Болтарь К. О., Акимов В. М., Власов П. В., Гришина А. Н., Иродов Н. А., Киселева Л. В., Лопухин А. А., Савостин А. В., Столяров Д. С. Способ изготовления утоньшенной двухспектральной фоточувствительной сборки. Патент № RU2676052C1, 2018.

5. Болтарь К. О., Киселева Л. В., Лопухин А. А., Савостин А. В. Способ изготовления матричного фотоприемника (варианты). Патент № RU2460174C1, 2011.

6. Болтарь К. О., Чижко В. Ф., Лопухин А. А., Власов П. В., Акимов В. М., Ефимов И. В., Ерошенков В. В., Киселева Л. В., Савостин А. В. Открытая зондовая установка тестирования матричных фотоприёмников и способ ускоренного тестирования матричных фотоприёмников. Патент № RU 2624623 C1, 2017. Бюл. № 19.

7. Концевой Ю. А., Литвинов Ю. М., Фатмахов Э. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. – Радио и связь, 1982.

8. Hilsun C., Rose-Innes A. C. Semiconducting III-V Compounds. – Pergamon Press, 1961.

9. Angus Macleod H. Thin-Film Optical Filters, Fourth Edition. – NY., CRC Press, 2010.

10. Kaiser Norbert, Pulker Hans K. // Optical Interference Coatings. – Springer, 2003.

11. <https://www.avacuum.ru/>,  
<https://avacuum.ru/rus/components/92/>

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c, 81.05.Ea, 81.65.Rv

## Multilayer interference coatings on the basis of the layers of silicon and dioxide of silicon on the thinning InSb FPA with increased mechanical strength and reproducibility

A. A. Lopukhin<sup>1</sup>, K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, A. N. Grishina<sup>1</sup>, and S. E. Shishigin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received January 25, 2022

*The paper considers the methods of increasing in mechanical strength and reproducibility in the construction of the two-spectral of the thinning InSb FPA by means of spraying of multilayer interference coatings on the basis of the layers of silicon and dioxide of silicon. The results of the simulation of the distribution of mechanical stresses and suppression of errors in the optical thickness of the antireflecting coatings with different quantity of layers are represented. Are obtained the experimental samples of two-spectral FPA, the confirmatory results of simulation.*

**Keywords:** Focal Plane Array (FPA), indium antimonide, silicon, silicon dioxide, multilayer interference coatings, strength, reproducibility, the simulation.



DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-14-22

#### REFERENCES

1. Linda Höglund, Rickard Marcks von Württemberg, Hithesh Gatty, Anders Gamfeldt, Carl Asplund, and Eric Costard, Proc. of SPIE **10111**, 1011116 (2017).
2. Herve Sik, Joel Fleury, Patrice Laprat, *Bispectral matrix sensor and method for manufacturing the same*, Patent US20170125614A1.
3. Pierre-Yves Delaunay, Brett Z. Nosh, Alexander R. Gurga, Sevag Terterian, and Rajesh D. Rajavel, Proc. of SPIE **10177**, 101770T-1 (2017).
4. K. O. Boltar, V. M. Akimov, P. V. Vlasov, A. N. Grishina, N. A. Irodov, L. V. Kiseleva, A. A. Lopukhin, A. V. Savostin, and D. S. Stolyarov, *Method of manufacturing a thinned two-spectral photosensitive assembly*, Patent No. RU2676052C1, 2018.
5. K. O. Boltar, L. V. Kiseleva, A. A. Lopukhin, and A. V. Savostin, *Method of manufacturing a matrix photodetector (variants)*, Patent No. RU2460174C1, 2011.
6. K. O. Boltar, V. F. Chishko, A. A. Lopukhin, P. V. Vlasov, V. M. Akimov, I. V. Efimov, V. V. Yeroshenkov, L. V. Kiseleva, and A. V. Savostin, *Open probe testing of matrix photodetectors and a method of accelerated testing of matrix photodetectors*, Patent No. RU 2624623 C1, 2017. Bul. No. 19.
7. Yu. A. Kontsevoy, Yu. M. Litvinov, and E. A. Fatkhov, *Plasticity and strength of semiconductor materials and structures*. (Radio and communications, 1982).
8. C. Hilsun and A. C. Rose-Innes, *Semiconducting III-V Compounds*. (Pergamon Press, 1961).
9. H. Angus Macleod // *Thin-Film Optical Filters*, Fourth Edition, 2010.
10. Norbert Kaiser and Hans K. Pulker, *Optical Interference Coatings*. (Springer, 2003).
11. <https://www.avacuum.ru/>,  
<https://avacuum.ru/rus/components/92/>