

07

©1995 г.

## ВЛИЯНИЕ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ И ГРАДИЕНТА ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИБОРАХ И ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*М. Ю. Волокобинский*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, 191065, Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 27 мая 1994 г.)

Рассматриваются различные типы неоднородностей, создаваемых в объеме и на поверхности полупроводниковых и диэлектрических структур с целью улучшения характеристик приборов и элементов электронной техники.

С уменьшением размеров элементов электронной техники все большее значение приобретает влияние неоднородностей и градиента диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и проводимости  $\sigma$  на картину электрического поля в диэлектрических и полупроводниковых структурах. Микронеоднородности могут играть как вредную роль, вызывая локальное увеличение напряженности электрического поля, так и полезную, например, препятствуя шнурованию тока в мощных биполярных транзисторах и позволяя повысить пробивное напряжение  $U_b$  без ухудшения высокочастотных характеристик; неравномерное распределение заряда на поверхности электродов существенно улучшает их стабильность. Поэтому целесообразно провести классификацию неоднородностей, подразделив их на 1) регулярные, т.е. периодически расположенные в пространстве или на плоскости, электрическое поле в структурах с которыми можно представить в виде разложения в тригонометрические ряды Фурье; 2) обусловленные градиентными свойствами материалов, например диэлектриков с проницаемостью, зависящей от координат, или полупроводников с изменяющейся в пространстве проводимостью; 3) связанные с краевыми эффектами, в частности у электродов; 4) неоднородности в материалах, подчиняющиеся статистическим закономерностям [1,2]; 5) случайные дефекты.

Особенностью электрических полей регулярных неоднородностей, существенно упрощающей их расчет, является связь коэффициентов

разложения в ряды Фурье потенциалов и зарядов в точках с заданными координатами, например, находящихся на электродах или поверхностях включений в объеме полупроводника или диэлектрика. Это позволяет произвести расчет электрических полей системы полосовых или островковых электродов и межэлектродных емкостей с требуемой для практических целей точностью, что важно, поскольку при малых размерах может доминировать краевая емкость.

Использование аналитико-машинного метода, основанного на аналитических формулах, расчет по которым производится с помощью ЭВМ, позволяет выявить закономерности распределения электрических и тепловых полей в сложных устройствах, их связь с характеристиками градиентных материалов и влияние на параметры электронных приборов [3-5].

Анализ физико-математических закономерностей распределения электрических полей в градиентных материалах показывает, что в них как бы изменяется метрика пространства и свойства симметрии: плоские слои из линейно-неоднородных диэлектриков, проницаемость которых  $\epsilon$  линейно зависит от координат, или полупроводники с линейно изменяющейся проводимостью  $\sigma$  в отношении электрического поля ведут себя подобно телам, обладающим осевой симметрией. Пластины из материалов с градиентом показателя преломления можно использовать в качестве линз, фокусирующих или рассеивающих свет, и призм.

Различие в свойствах однородных и градиентных материалов отражается на математическом описании. Распределение потенциала  $\varphi$  электрического поля в градиентном диэлектрике подчиняется уравнению

$$\epsilon \Delta \varphi + \text{grad } \epsilon \text{ grad } \varphi = \rho,$$

где  $\rho$  — объемная плотность заряда, которое для однородного материала, когда  $\text{grad } \epsilon = 0$ , сводится к уравнению Пуассона  $\Delta \varphi = -\rho/\epsilon$ , а при  $\rho = 0$  — к уравнению Лапласа  $\Delta \varphi = 0$ .

Следовательно, решения задач для потенциала в устройствах с градиентными материалами обладают общностью и в предельном случае ( $\text{grad } \epsilon \rightarrow 0$ ) их можно использовать и для структур с однородными диэлектриками. Кроме того, для конструкций на основе градиентных материалов сохраняется известная для структур с однородными материалами общность решения задач электростатики, тепло- и электропроводности, т.е. решение задачи для распределения потенциала в диэлектрике можно использовать и для описания распределения потенциала в полупроводнике, заменив лишь  $\epsilon$  на  $\sigma$ , или для распределения температуры  $T$ , заменив  $\varphi$  на  $T$  и  $\epsilon$  на коэффициент теплопроводности  $K$ , при условии их одинаковой зависимости от координат.

Различие в свойствах однородных и градиентных материалов и закономерностях поведения в них электрического поля можно применить на практике для управления распределением электрического поля в приборах. Например, известно, что в конструкциях с осевой или сферической симметрией на основе однородных материалов напряженность электрического поля убывает с увеличением радиуса  $r$ . В осесимметричных устройствах с градиентными материалами, в которых потенциал вдоль оси не изменяется и  $\epsilon r = \text{const}$  или  $\sigma r = \text{const}$ , напряженность электрического поля постоянна по величине. В сферически симметричных конструкциях для обеспечения постоянной величини

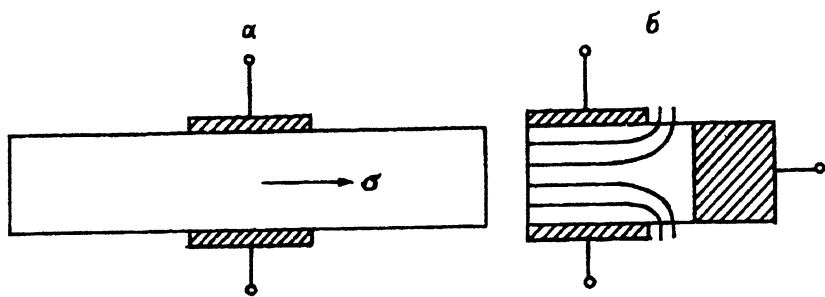


Рис. 1. Полупроводниковая пластина с удельной проводимостью  $\sigma$ , возрастающей в направлении, указанном стрелкой, и электродами, нанесенными на ее поверхность (а), эквивалентная схема, поясняющая природу увеличения локальной напряженности электрического поля у краев электродов со стороны, где больше  $\sigma$  (кривые — эквипотенциалы) (б).

ны напряженности электрического поля требуется, чтобы выполнялось условие  $\epsilon r^2 = \text{const}$  или  $\sigma r^2 = \text{const}$ .

Интересной особенностью градиентных полупроводников или диэлектриков является кардинально различное влияние на картину распределения электрического поля у края электродов в зависимости от направления, в котором изменяется  $\sigma$  или  $\epsilon$ . Если  $\sigma$  изменяется по толщине пластины, то напряженность электрического поля выше у краев электрода, нанесенного на поверхность, где  $\sigma$  или  $\epsilon$  меньше. Если же  $\sigma$  или  $\epsilon$  возрастает в направлении, параллельном плоскости электродов, показанном стрелкой на рис. 1, то напряженность больше у края электрода с большей  $\sigma$  или  $\epsilon$ . Качественно такое поведение электрического поля в пластине из градиентного материала можно пояснить, предположив столь резкое изменение  $\sigma$  (или  $\epsilon$ ), что допустимо пренебречь токами левее электродов и считать, что пластина оборвана у левого края электродов, а правее них проводимость очень значительна

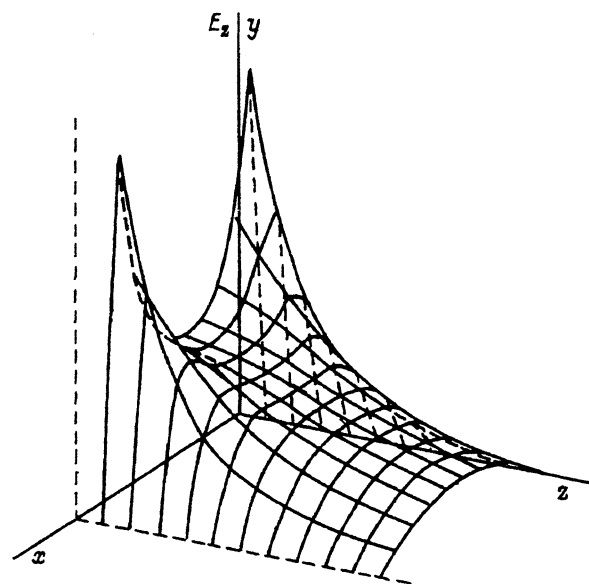


Рис. 2. Зависимость нормальной составляющей напряженности электрического поля  $E_z$  над положительно заряженной полосой от расстояния  $z$  до нее в электрическом поле, создаваемом системой чередующихся положительно и отрицательно заряженных полос.

и правую часть пластины возможно рассматривать как закорачивающую металлическую перемычку (рис. 1,б). Очевидно, в этом случае электрическое поле между электродами у левого края будет близко к однородному, а между правым краем электродов и металлической перемычкой будет иметь повышенную напряженность.

Пользуясь машинной графикой, можно изобразить пространственное распределение напряженности электрического поля; например, на рис. 2 представлено распределение вертикальной составляющей  $E_z$  (т.е. в направлении, перпендикулярном плоскости электрода) напряженности электрического поля над заряженной металлической полосой; ось  $x$  лежит в плоскости полосы и направлена перпендикулярно ее краям. Как видно из рис. 2, вблизи полосы нормальная составляющая напряженности  $E_z$  наиболее велика у краев, а вдали от нее — над серединой полосы. В идеализированном случае бесконечно тонких металлических электродов на их краях напряженность обращается в бесконечность и поэтому не показана на рис. 2. Однако идеализированное представление оправдано и удобно при расчетах напряженности электрического поля на некотором расстоянии от электродов. Идеализированный расчет дает бесконечное значение напряженности лишь на краю электродов, в частности на оси  $x$  только в двух точках, лежащих на границах полосы. При расчетах напряженности вблизи краев необходимо принимать во внимание структуру электродов.

С совершенствованием технологии изготовления градиентных материалов и структур с микронеоднородностями открываются заманчивые перспективы их использования в функциональной электронике. В частности, создавая в плоском слое кольцевые микронеоднородности с изменяющимся по радиусу показателем преломления света, можно привязать к ним вихри электромагнитного поля. Микрообразование представляют принципиально новый класс физических объектов, обладающих резонансными свойствами и дискретным энергетическим спектром, которые, по-видимому, найдут применение в технике, например, в устройствах кратковременного хранения оптической информации в быстродействующих ЭВМ, генераторах, усилителях и фильтрах электромагнитного излучения.

#### Список литературы

- [1] Харитонов Е.В. Диэлектрические материалы с неоднородной структурой. М.: Радио и связь, 1983. 128 с.
- [2] Харитонов Е.В. // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1988. Вып. 3 (279). С. 6-7.
- [3] Волокобинский М.Ю. // ДАН. 1991. Т. 316. С. 96-100.
- [4] Волокобинский М.Ю. // ДАН. 1991. Т. 316. С. 597-600.
- [5] Волокобинский М.Ю. // ДАН. 1993. Т. 331. С. 165-167.