

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

А.А. Люзе, В.А. Преснов
(Томск)

Проблемы увеличения быстродействия и надежности вычислительных машин, а также - уменьшения их размеров и стоимости заставляют искать новые пути при конструировании полупроводниковых приборов.

При этом возможны два направления:

а) использование новых материалов при разработке известных типов приборов, применяя новые материалы, добиваться существенного улучшения характеристик приборов;

б) на основе объемных эффектов, объединяемых общим названием плазменные явления в полупроводниках, которые за последние годы усиленно изучаются, возможно создание целого ряда новых приборов, обладающих своеобразными свойствами. Возможно, что эти приборы приведут к новым решениям ряда функциональных узлов вычислительных машин.

Из новых материалов, которые находятся на стадии промышленного освоения, наибольшая роль отводится арсениду галлия, затем антимиониду индия и сульфиду кадмия.

Основные характеристики этих материалов приведены в таблице.

Таблица
Сравнение характеристик полупроводниковых материалов

Материал	Ширина запрещенной зоны (э.в)	Подвиж- ность электро- нов $\frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$	Подвиж- ность дырок $\frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$	Время жизни электронов (сек)	$\mu_p \mu_n$
Арсенид галлия	1,47	12000	200	$10^{-8} + 10^{-12}$	$2,5 \cdot 10^6$
Антимонид индия	0,17	80000	450		
Сульфид кадмия	2,59	340	18		
Германий	0,66	3600	1200	$10^{-4} + 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^6$
Кремний	1,137	1400	380	$10^{-6} + 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^6$

I. Для оценки частотного предела транзисторов, изготовленных из разных материалов, можно воспользоваться "фактором качества" [I]

$$M \sim \mu_p \cdot \mu_n \cdot \frac{1}{w_b S_k} \sqrt{u_k N} ,$$

где $\mu_p \cdot \mu_n$ - подвижности дырок и электронов;

w_b - ширина базы;

S_k - площадь коллектора;

u_k - напряжение коллектора;

N - концентрация примесей в базе.

При сравнении фактора качества транзисторов, изготовленных из разных материалов, нужно учитывать только произведения подвижностей. Произведение остальных сомножителей всегда можно удачной конструкцией приборов сделать сравнимым.

Из таблицы видно, что фактор качества у арсенида галлия выше чем у кремния и сравним с фактором качества германия. Если сравнить ширину запрещенной зоны, которая определяет верхний предел рабочей температуры прибора, то арсенид галлия является более перспективным материалом для транзисторов, чем германий. Но здесь есть одно существенное ограничение: малые времена жизни неосновных носителей тока в арсениде галлия приводят к малым диффузионным длинам (меньше 1 мк). Ширина базы в триоде должна быть меньше диффузионной длины неосновных носителей, чтобы получить приемлемые значения коэффициента уси-

ления по току, что приводит к большим технологическим трудностям при изготовлении триодов из арсенида галлия.

Само по себе требование рабочей частоты триода выше 1 ГГц, обуславливает ширину базы порядка микрона. Время пролета носителя тока через базу должно быть меньше периода колебаний. Таким образом создание высокочастотного триода из арсенида галлия будет возможным при наличии материала с диффузионной длиной порядка 10 мк и разработки технологии, обеспечивающей получение высокоэффективного эмиттера при наличии узкой базы.

2. Более перспективными приборами из арсенида галлия являются различные типы импульсных и переключающих диодов.

Для получения большой скорости срабатывания таких приборов необходимо, чтобы время жизни неосновных носителей было мало. С этой целью в германий или кремний, идущий на изготовление диодов, вводятся специальные примеси, снижающие время жизни неосновных носителей.

У арсенида галлия время жизни неосновных носителей меньше, чем у специально легированных германия и кремния. Поэтому уже первые образцы точечных импульсных диодов из арсенида галлия имеют время переключения 10^{-9} сек, что превышает лучшие образцы кремниевых приборов.

С учетом улучшения характеристик исходного материала, усовершенствования конструкции приборов из арсенида галлия, можно ожидать достижения времен переключения до $10^{-10} + 10^{-11}$ сек.

Таким образом в ближайшие несколько лет импульсные и переключающие диоды из арсенида галлия вполне могут заменить аналогичные приборы из кремния.

Транзисторы же из арсенида галлия еще требуют значительной доработки, пока они будут в состоянии вытеснить высокочастотные приборы из германия.

3. Разработан ряд элементов вычислительных машин, работающих при низких температурах. Это потребовало создание датчиков низких температур, позволяющих быстро измерять температуры вплоть до гелиевых. Наилучшие результаты получены на переходах из арсенида галлия. У них напряжение на диоде при постоянном прямом токе почти линейно зависит от температуры до 2°K.

Кроме датчиков температуры, нужны диоды и триоды, имеющие рабочий диапазон до гелиевых температур.

Для таких приборов нужны полупроводники, имеющие узкую

ширину запрещенной зоны. Из интерметаллидов лучше всего подходит антимонид индия. Но пока сделаны только первые шаги по разработке приборов из антимонида индия.

4. Другой путь создания триодов, работающих при низких температурах, это так называемые оптоэлектронные транзисторы [2]. В таком триоде эмиттером служит переход из арсенида галлия, излучающий свет, который улавливается гетеропереходом из арсенида галлия - германия, где происходит обратное преобразование светового сигнала в электрический. Так как сигнал через область базы переносится фотоном, то снимается ограничение на ширину базы. Она не влияет на коэффициент усиления по току и граничную частоту. Особенностью этого прибора является то, что эмиттер и коллектор электрически разделены. Это позволяет решить ряд схемных вопросов проще, чем у обычных транзисторов. Кроме того, такие приборы должны хорошо работать до гелиевых температур, так как инжекционные характеристики перехода из арсенида галлия при низких температурах возрастают.

В опытных образцах приборов достигнут коэффициент усиления по току меньше 0,1, а рабочая частота до 10 ГГц.

5. Полевой триод [3]. Избежать влияние малого времени жизни неосновных носителей на параметры триода можно в триодах, работающих на основных носителях. К ним относится ряд приборов, называемых МОП (металл-окисел-полупроводник) триодами, а также канальный триод.

Наиболее разработаны триоды МОП и МДП (металл-диэлектрик-полупроводник). Конструктивно они устроены следующим образом: тонкая пленка полупроводника, длиной несколько миллиметров и шириной меньше мм, имеет на концах омические контакты. Сверху на полупроводник напыляется диэлектрик толщиной 1000-5000 Å. На диэлектрик наносится металлический олоу. Управляющий сигнал прикладывается между одним из базовых выводов и металлом. Под действием электрического поля в полупроводнике возникает область пространственного заряда, которая регулирует проводимость полупроводника.

Оптимальной особенностью таких приборов является высокое входное сопротивление, достигающее 10^{15} ом.

При изготовлении таких приборов из арсенида галлия они могут работать в широком интервале температур 77°K-600°K. Весь прибор изготавливается напылением, что делает его удобным для применения в интегральных схемах.

6. За последние годы на стадии лабораторных разработок появился целый ряд новых приборов с специфическими свойствами. Это приборы использующие для усиления и генерации электромагнитных колебаний неустойчивости плазмы полупроводника. Из многочисленных неустойчивостей рассмотрим те, на основе которых можно ожидать появление пригодных приборов в ближайшее будущее.

1. СВЧ генераторы и усилители на основе эффекта Ганна.

Эффект Ганна состоит в появлении колебаний тока в арсениде галлия с частотой $10^8 - 10^{11}$ гц при превышении напряженности электрического поля в объеме выше порогового поля, составляющего около 3000 в.см^{-1} [4]. Теория данного эффекта, предложенная Ридли-Хилсумом [5], объясняет появление колебаний тока возникновением в объеме полупроводника областей сильного поля, так называемых доменов. Возникновение доменов на отрицательном контакте и их исчезновение на положительном вызывает колебания тока. Скорость движения доменов порядка 10^7 см.сек^{-1} . Тем самым для получения высоких частот нужно брать короткие образцы. Например для получения частоты в 1 Ггц нужна длина образца 100 мк.

Домен образуется в образце при электрических полях выше критического, когда начинается переход электронов из основного минимума зоны проводимости, расположенного в центре зоны Бриллюэна, в боковые минимумы. В боковых минимумах подвижность электронов мала. Поэтому при переходе части электронов в боковые минимумы дрейфовая скорость электронов с ростом поля начинает падать, появляется отрицательная дифференциальная подвижность. С формальной точки зрения можно этот процесс толковать как дифференциальное объемное сопротивление.

Из свойств этого явления возможно два применения:

- а) как генератор СВЧ колебаний;
- б) как усилитель на те же частоты.

Приборы на эффекте Ганна должны быть дешевыми и массовыми генераторами СВЧ энергии. Его простота и дешевизна должна привести к широкому распространению техники СВЧ во все отрасли промышленности. До сих пор препятствием к широкому распространению СВЧ техники служила высокая стоимость источников энергии. Как генераторы, приборы на эффекте Ганна, могут перекрыть по частоте

те диапазон от 10^8 до 10^{11} гц при мощностях от сотен ватт на нижнем конце диапазона до 0,5 вт на верхнем.

Для использования этих приборов как усилителя нужна еще большая работа по улучшению их шумовых характеристик. Пока слишком высок уровень шума, достигающий 38 дбб при коэффициенте усиления порядка 23 дбб [6].

Нужно отметить, что эффект Ганна обусловлен зонной структурой арсенида галлия. Подобная структура имеется еще у некоторых сложных полупроводников, например, арсенид индия, теллурид кадмия. Но у этих материалов энергетический зазор между минимумом больше, чем у арсенида галлия, что приводит к гораздо большим значениям критического электрического поля.

Таким образом, практическое применение имеют пока приборы из арсенида галлия.

7. Другой тип неустойчивости - пьезоэлектрическая [7]. Этот тип неустойчивости также обусловлен возникновением доменов. Только механизм возникновения отрицательной подвижности обусловлен нелинейным электрон-фононным взаимодействием, которое в пьезоэлектрически активном направлении в полупроводнике становится доминирующим в своем влиянии на подвижность электронов.

Возникшие домены движутся со скоростью звука в арсениде галлия, соответственно и частоты возникающих колебаний на два порядка ниже, чем при эффекте Ганна.

Возможность построения генератора показана, причем к.п.д. преобразования постоянного тока в переменный можно ожидать высоким, достигающим 60%. Критические поля возникновения неустойчивости лежат в пределах $500-1000 \text{ в.см}^{-1}$. Это в несколько раз снижает тепловыделение по сравнению с эффектом Ганна, что значительно упрощает проблемы конструирования прибора. Подобный эффект наблюдался в CdS , GaSb , ZnO . Из всех этих материалов наиболее изученный и доступный арсенид галлия. По-видимому, первые промышленные образцы приборов будут созданы из него.

Вероятно, данное явление можно использовать также для усиления электрического сигнала.

8. Бистабильные элементы - криосары [8].

Работа прибора основана на лавинообразной ударной ионизации в сравнительно сильно легированном и компенсированном полупроводнике при температурах $4-20^\circ\text{К}$. Удалось наблюдать это

явление в кремнии при 77°K . Критическое поле пробоя порядка $50\text{--}300\text{ в.см}^{-1}$, поддерживающее поле после пробоя, в несколько раз меньше, что приводит к появлению на характеристике участка с отрицательным сопротивлением.

Прибор состоит из пластины германия, на которую с противоположных сторон в матричной форме нанесены контакты. Каждая пара может включаться независимо от другой.

Скорость срабатывания прибора лежит в интервале нескольких наносекунд. Причем время включения примерно равно времени выключения.

9. Целый ряд сложных полупроводников GaAs , CdS , CdTe обладает пьезоэлектрическими свойствами. Используя эти свойства, можно построить усилители акустических волн, преобразователи электрических колебаний в акустические, линии задержки и др.

Усиление акустических волн было получено в сульфиде кадмия. Оно получается за счет непосредственной передачи энергии от системы электронов решетки, когда скорость дрейфа носителей тока превышает скорость акустических волн. На частоте 45 Мгц наблюдалось усиление, равное 38 дБ [9]

Показана успешная работа усилителя на частотах до 1 Ггц .

Для антимонида индия теоретическое значение коэффициента усиления на частоте 9 Ггц равно 10 дБ.см^{-1} .

Другая важная область применения пьезоэлектрических полупроводников — преобразователи электрического сигнала в другие колебания. Классические преобразователи из кварцевых пластинок можно использовать только до 300 Мгц . Предел этот обусловлен техническими трудностями приготовления достаточно тонких монокристаллических пластинок.

Из полупроводников можно приготовить достаточно эффективные преобразователи из тонких пленок, которые получают напылением на соответствующую поверхность.

Другой путь получения преобразователя, который пригоден, если ультразвук распространяется в полупроводнике, — получение тонких слоев преобразователя диффузией примеси в торец стержня [10] из сульфида кадмия.

Пленочные преобразователи работают достаточно эффективно до частот 9 Ггц .

Таким образом, уже сейчас можно построить акустический усилитель, который может обеспечить очень большое усиление

акустических волн на высоких частотах. Такой усилитель можно использовать вместе с линиями задержки на этих частотах, а в скором времени он будет применяться как составная часть линий задержки с малыми потерями на СВЧ. Хотя в качестве усилителя электрических сигналов это устройство в настоящее время не способно конкурировать с существующими устройствами СВЧ, можно надеяться, что с развитием новых преобразователей и улучшенных материалов будет создан хороший компактный усилитель СВЧ.

Ю. В плазме полупроводников существуют неустойчивости, которые можно использовать для генерации и усиления электромагнитных волн. Из большого числа неустойчивостей рассмотрим две неустойчивости.

а) Градиентная неустойчивость инжектированной плазмы в германии [11]. Этот тип неустойчивости возникает в германии при наличии сильного электрического поля (500 в.см^{-1}) и градиента температуры. В зависимости от параметров материала частота колебаний лежит в пределах от 0,5 МГц до 10 МГц. Амплитуда переменного напряжения составляет 150 в. Таким образом, на данном эффекте можно создать генератор синусоидального сигнала с мощностью в несколько сотен ватт.

Ввиду больших удельных мощностей ($2,5 \cdot 10^4 \text{ вт.см}^{-3}$) данный прибор может работать только в импульсном режиме (длительность импульсов 1-50 миксек при частоте следований десятка гц). Требуется еще дальнейшая работа, чтобы создать прибор, работающий в непрерывном режиме.

Возможен и другой вариант данного эффекта, когда неустойчивость плазмы возникает при наличии электрического поля и градиента концентрации [12].

Градиент концентрации возникает за счет эффекта сильного поля [13] на слабоинжектирующем контакте. На расстоянии 1-2 мм от контакта, включенного в запорном направлении возникает область сильного поля. В этой области возникает неустойчивость тока. Поэтому размеры образца не влияют на частоту колебаний.

На частоту колебаний влияют подвижность и диффузионная длина неосновных носителей тока.

Колебания тока в данном явлении возникают вследствие пульсаций пространственного заряда в области сильного поля. Частоты колебаний можно получить в том же диапазоне, что и в предыдущем случае. Вследствие включения одного из контактов в запорном направлении плотности тока значительно меньше. Тем самым облегчается тепловой режим прибора.

Нужно получить данный эффект в сложных полупроводниках, в них можно ожидать более высокие частоты колебаний.

Предварительные эксперименты показали, что данную неустойчивость можно также использовать для усиления электрических сигналов. Возможно, что механизм данного явления описывается теорией неустойчивости, предложенной Гуревич и Иоффе [14].

На важную роль области в полупроводнике, где происходит процесс преобразования потока неосновных носителей в поток основных носителей, на возникновение неустойчивости, указывает следующее явление [15].

Если в брусок германия n типа (размеры $1 \times 1 \times 5$ мм³), вплавлять омический контакт в боковую грань на расстоянии диффузионной длины от p - n перехода (на другом торце бруска омический контакт), то между этим зондом и торцовым выводом возникают колебания. Причем это колебания напряжения, не сопровождаемые колебаниями тока в цепи с бруском германия. Частоту колебаний можно легко регулировать, подключая параллельно выводам конденсатор.

Возможно, что данное явление обуславливает возникновение колебаний в осциллисторе. Осциллистор или геликоидальная плазменная неустойчивость [16] возникает при дрейфе электронно-дырочной плазмы в присутствии магнитного поля. Возникновение в плазме геликоидального возмущения плотности приводит к возникновению азимутальной составляющей тока, которая взаимодействует с продольным магнитным полем. Его сила направлена так, что она стремится увеличить винтовое возмущение. Если сила достаточно велика, чтобы преодолеть обусловленное диффузией затухание, то возмущение будет нарастать.

На основании данного эффекта можно создать управляемый генератор. Частоту и мощность такого генератора можно менять, изменяя такие параметры, как величина и взаимная ориентация внешних электрического и магнитного полей [17], поверхностные условия [18].

Геликон является ТЕМ электромагнитной волной с круговой поляризацией, которая может распространяться со слабым затуханием в твердых телах вдоль магнитного поля.

При наличии дрейфа носителей тока взаимодействие геликона с носителями тока приводит к усилению вводимого внешнего сигнала. Когда в плазме есть только один тип носителей (элек-

троны или дырки), то при наличии дрейфа в ней невозможно получить усиление бегущей волны. Однако, если электроны и дырки присутствуют в равных количествах, нарастающая неустойчивость может возникнуть и при наличии дрейфа носителей [19]. При подаче электрического поля, вызывающего дрейф, электроны могут достигать скоростей больших, чем фазовая скорость усиливаемой волны. Взаимодействие, которое приводит к неустойчивости, определяется силой Лоренца, возникающей при наличии скорости дрейфа у электрона и ВЧ магнитного поля. Эта сила направлена вдоль ВЧ электрического поля и при достижении пороговых условий вызывает нарастание волны. При появлении неустойчивости влияние электронов на диэлектрическую проницаемость прекращается, поэтому, для сохранения большой диэлектрической проницаемости, которая нужна для того, чтобы фазовая скорость волны оставалась малой, необходимо наличие дырок.

Частотный предел в усилителях такого типа определяется скоростью дрейфа электронов и плотностью плазмы. Максимальная частота усиливаемого сигнала прямо пропорциональна произведению плотности плазмы на квадрат скорости дрейфа.

Но большая плотность плазмы затрудняет получение больших скоростей дрейфа, так как это связано с пропусканием тока большой плотности.

Видимо, реально достижимое значение частот лежит в пределах до 100 МГц.

Приборы, использующие плазменные явления в полупроводниках, находятся на начальной стадии своего развития. Их дальнейший прогресс зависит прежде всего от того, будет ли найдена для них достаточно широкая область применения.

Л и т е р а т у р а

1. Я.А. Федотов. Основы физики полупроводниковых приборов. Москва. Советское радио, 1963 г., стр. 427.
2. ТИИЭР, том 54, № 10, 1966 г.
3. J.T.Wallmark. RCA Review, 1964, vol. 24, 641.
4. I.B.Gunn. IBM Journal, 1964, vol. 8, 141.
5. B.K.Ridly, T.B.Watkins. Proc. Phys. Soc., 1961, vol. 78, 293.
6. B.W.Hakki. Proc. IEEE, 1966, vol. 54, 299.
7. Okada J. et al. Jap. J. App. Phys., 1963, vol. 2, 736.

8. ТИИЭР, 52, № 10, 1188, 1964 г.
9. A.R.Hutson et al. Phys.Rev.Lett., vol. 7, 237, 1961.
Харкот и др. Зарубежная радиоэлектроника, № 10, 83,
1966 г.
10. Chubachi N., Wada M., Kikuchi Y. Jap.J.App.Phys., 1964,
vol.3, N 12.
11. Л.Л. Люзе, В.Л. Шушкевич, ФТТ, 8, 1939, 1966 г.
12. Л.Л. Люзе, В.Л. Шушкевич. Труды III конференции по физике
переходов. Тбилиси, 1966 г. (в печати).
13. J.B.Arthur, A.F.Gibson, J.B.Gunn. Proc.Phys.Soc., 1956,
vol.B69, 697.
14. Л.Э. Гуревич, И.В.Иоффе. ФТТ, 5, 2674 (1963 г.).
15. И.М. Викулин, Л.Л. Люзе, В.А. Преснов. III Всесоюзное со-
вещание по физическим явлениям в p-n-переходах.
Тбилиси, 1966 г. (в печати).
16. Ю.И. Иванов, С.М. Рывкин. ЖТФ, 28, 774 (1958).
17. Л.Л. Люзе, Р.Б. Бурлаков, ФТТ, 8, 984 (1966).
18. Л.Л. Люзе, Н.М. Старшинина. Доклады Н.Т. конференции,
посвященной дню Радио. Томск, 1966 г. с. 65.
19. J.Bok, P.Nozières. J.Phys.Chem.Soc., 1963, vol.24, 709.