

А. Я. ЧИЛАП

## ФИЛЬТРАЦИОННО-ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ АНАЛОГИЯ

(Представлено академиком Ш. Я. Кочинной 12 XI 1971)

Как известно, принцип электрогидродинамической аналогии, широко применяемый в расчетах при помощи физического моделирования, заключается (в применении к фильтрации жидкости в пористой среде) в том, что сильно идеализированная модель фильтрации описывается математически теми же уравнениями (например, Лапласа, Фурье), что и течение тока в проводниках.

Эта аналогия учитывает лишь самые примитивные общие черты двух явлений. Между тем, в сложном явлении фильтрации имеется целый ряд факторов, без учета которых любая модель весьма далека от реальности. С другой стороны, учет даже некоторых из них обнаруживает явное качественное несоответствие между течением тока в проводниках и фильтрацией жидкости в пористой среде. Это несоответствие, как видно из ряда приводимых ниже эффектов, исчезает, если рассматривать течение тока не в проводниках, а в полупроводниках.

**Нелинейность.** Аналогом закона Дарси (в фильтрации) является закон Ома (в электричестве). Для проводников он достаточно строго выполняется; для полупроводников, как правило, имеют место отступления от этого закона: это или нелинейность вольт-амперной характеристики на начальном участке (закон трех вторых) или во всем рабочем диапазоне, или практически наличие у нее (в пределах точности измерений) некоторого порога по напряжению.

Исследованиями последних лет установлено, что для большинства фильтрующихся жидкостей закон Дарси также нарушается. Это нарушение особенно заметно при достаточно больших депрессиях. У вязкопластичных нефтей практически наблюдается начальный градиент сдвига на депрессионной кривой.

**Инерционность.** Этот эффект связан с первым; его наличие в фильтрации общеизвестно. На рис. 1 приведены зависимости дебита  $Q$  и тока  $I$  от времени, соответствующие синусоидальной зависимости депрессии  $\Delta P$  и напряжения  $E$  от времени, иллюстрирующие инерционность в пористой среде и в полупроводнике ( $\sigma$ ) и ее отсутствие в проводнике ( $a, б$ ).

**Релаксация.** На рис. 2 для пористой среды проводника и полупроводника показан переход с одного установившегося режима на другой по дебиту и току, соответствующий скачкообразному переходу по депрессии и напряжению.

**Температурный эффект.** С ростом температуры вязкость нефти, а вместе с ней и фильтрационное сопротивление пористой среды уменьшается. Электрическое сопротивление полупроводника также падает с увеличением температуры. В металле и других проводниках, используемых обычно для целей электромоделирования, рост температуры ведет к росту сопротивления.

**Взаимодействие.** В отличие от проводников на проводимость полупроводников влияет множество факторов, увеличивающих их энергию активации. Ее увеличивает также введение в ничтожных количествах ряда примесей. То же самое наблюдается и в фильтрации. Присадки

для уменьшения трения фильтрующихся жидкостей в нефтяных пластах, воздействие на гидропроводность пласта инфразвуком и периодической закачкой также уменьшают фильтрационное сопротивление пластов.

**Тензорезистивный эффект.** Фильтрационное сопротивление, так же как и электрическое сопротивление полупроводника, изменяется в результате действия нагрузки, создающей деформацию. Тензочувствительность полупроводников в десятки раз превышает тензочувствительность металлов.

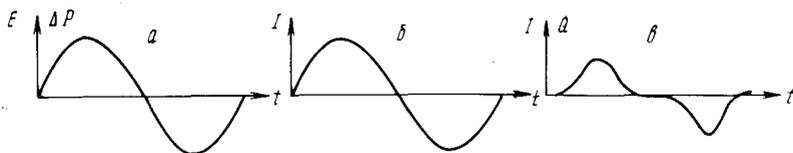


Рис. 1

**Термодиффузия.** И в пористой среде, и в полупроводнике градиент температуры приводит к градиенту концентрации подвижных элементов, вследствие чего возникает их диффузионный поток. Градиент температуры при прохождении потока вызывает выделение или поглощение тепла.

**Барьерный эффект.** Как известно, фильтрационное сопротивление при вытеснении одной жидкостью другой в прямом и обратном направлениях неодинаково. Ток в полупроводнике через  $(p-n)$ -переход также зависит от направления его протекания. С токами в металлах ничего подобного не происходит.

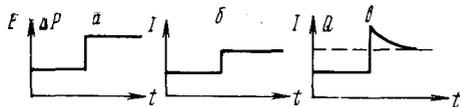


Рис. 2

Из рассмотренных перечисленных эффектов видно, что физические явления течения тока в полупроводнике и жидкости в пористой среде во многом качественно подобны. Таким образом, можно сказать, что пористая среда с фильтрующейся в ней жидкостью является своеобразным полупроводником, в котором роль решетки играет пористый скелет, а роль носителей зарядов — частицы жидкости.

Это может служить основой для решения ряда задач фильтрации моделированием с использованием полупроводниковых устройств. Одно из таких устройств автором уже создано. Оно служит для быстродействующего игрового моделирования ряда задач разработки нефтяных месторождений при нелинейном законе двумерной фильтрации.

Этот же факт позволит, кроме того, лучше понять или даже предсказать некоторые фильтрационные явления, а также применить к теории поля в полупроводниках успешно развиваемые в настоящее время методы аналитического расчета нелинейности фильтрации. Он открывает также возможность разработки теории фильтрации на основе, аналогичной зонной теории проводимости.

Казанский государственный университет  
им. В. И. Ульянова-Ленина

Поступило  
10 XI 1971